

LES SOLUTIONS ANTISALISSURES : ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE ET  
AVENUES POSSIBLES AFIN DE RÉDUIRE LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Par  
Marc Filiatrault

Essai présenté au Centre universitaire de formation  
en environnement et développement durable en vue  
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Février 2019

## SOMMAIRE

Mots-clés : antialgasse, pollution eau, pollution marine, bateaux, contaminant aquatique, transport maritime, bioalgasse, coques, revêtements, navire, espèce exotique envahissante, TBT, cuivre

L'objectif de cet essai est de faire l'analyse des revêtements antialgasses utilisés par les navires marchands. Ces substances permettent une protection contre les salissures d'origine biologiques et préviennent le déplacement des espèces exotiques envahissantes. Elles influencent également le comportement hydrodynamique des bateaux en réduisant la trainée. Les produits utilisés antérieurement tout comme ceux d'aujourd'hui ont néanmoins des impacts environnementaux. Conséquemment, les armateurs sont confrontés à des législations nationales de plus en plus restrictives tout en maintenant une compétitivité logistique et financière. La problématique centrale de cet essai est d'évaluer quelles actions peuvent être posées par les parties prenantes afin de diminuer les impacts environnementaux des produits antialgasses tout en conservant les bénéfices liés à leur utilisation. Deux experts du domaine font état, via leurs témoignages, de la réalité de la recherche terrain et des contraintes lors de la mise en marché de nouveaux produits.

L'analyse de l'historique des produits antialgasse démontre que les composés employés ont des effets sur l'environnement, mais que ceux-ci ne sont perceptibles que plusieurs années après l'utilisation initiale. Or, certains écosystèmes s'avèrent être des milieux uniques qui exigent une meilleure protection contre les agents chimiques utilisés dans le domaine maritime. Diverses mesures sont nécessaires afin de réduire les impacts des activités navales. Des mesures législatives doivent être prises afin d'élargir les responsabilités des parties prenantes et de mieux encadrer l'utilisation des revêtements des coques des navires. Aussi, des restrictions opérationnelles sont nécessaires afin d'exercer un contrôle plus serré des pratiques ce qui permettra d'éviter les comportements déviants et d'avoir une meilleure connaissance des milieux naturels. De plus, les engagements internationaux sont à être mis à jour afin de mieux encadrer les usages des produits utilisés en fonction des connaissances actuelles et d'octroyer une reconnaissance transnationale des milieux uniques au Canada.

Les recommandations mettent l'emphasis sur le développement des nouvelles technologies, l'amélioration des techniques de maintenance de même qu'une meilleure explication de la réglementation. Elles permettraient de réduire l'empreinte écologique des produits antialgasses. Finalement, les conclusions statuent que les recouvrements contre l'incrustation des organismes marins sont essentiels pour maintenir les performances opérationnelles des navires tout en offrant une protection contre les espèces exotiques envahissantes. Ultimement, le Canada doit prendre action afin d'occuper une position de meneur sur la scène internationale afin de protéger adéquatement la biodiversité présente dans ses eaux nationales.

## **REMERCIEMENTS**

Je voudrais remercier François Lafortune, Nicolas Toupont et Michel Deblois pour leurs contributions à la rédaction de cet essai.

Je voudrais également remercier ma conjointe (Karine Daviau) pour sa patience lors de mes nombreuses soirées et fins de semaine passées dans les cours et les projets académiques.

Finalement, je voudrais souligner la contribution des professeurs et de mes collègues étudiants tout au long de cette maîtrise, car c'est le cheminement parcouru durant les études qui permet de développer son esprit critique et de faire évoluer sa vision systémique.

## TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
1. MISE EN CONTEXTE .....	4
1.1. Les fonctions techniques des revêtements .....	5
1.1.1. La perte d'aérodynamisme des coques et la surconsommation de carburant .....	7
1.1.2. La surconsommation de carburant.....	9
1.1.3. La longévité des coques des bateaux .....	11
1.1.4. Le déplacement des espèces exotiques envahissantes (EEE) .....	13
1.2. L'historique et évolution des technologies et leurs impacts environnementaux .....	16
1.2.1. Les types de technologies et des agents chimiques .....	19
1.2.2. Les restrictions .....	21
2. L'UTILISATION ACTUELLE DES PRODUITS ANTISALISSURES ET PRÉVISION DE LA DEMANDE FUTURE.....	23
2.1. L'état du marché actuel et futur des produits antisalissure .....	23
2.2. L'évolution du transport maritime mondial et des émissions de gaz à effet de serre .....	24
2.3. L'évolution transport SUR LE FLEUVE SAINT-LAURENT .....	27
3. LES NORMES ET RÉGLEMENTATIONS .....	32
3.1. Les normes internationales.....	32
3.2. La réglementation canadienne : fédérale et provinciale.....	33
3.3. Les autres réglementations dans le monde.....	34
3.3.1. L'Australie .....	35
3.3.2. La Californie.....	38
3.3.3. L'Union européenne et la Suède.....	39
4. LES ENTREVUES AVEC DES EXPERTS DU DOMAINE DES ANTISALISSURES.....	44
4.1. L'entrevue avec Nicolas Toupoint, Ph. D. ....	44
4.2. L'entrevue avec Michel Deblois .....	46
5. LA FEUILLE DE ROUTE DES PROCHAINS JALONS POUR LES REVÊTEMENTS ANTISALISSURES .....	48
5.1. Les objectifs mondiaux .....	48
5.2. Les objectifs du Canada .....	49
6. LES SECTEURS DE RECHERCHE DES PRODUITS ANTISALISSURES .....	51
6.1. Les cathodes et anodes .....	51
6.1.1. Les avantages.....	53
6.1.2. Les inconvénients.....	53
6.1.3. Les inconnus .....	54
6.2. Le développement de surface liquide.....	55
6.2.1. Les avantages.....	56

6.2.2. Les inconvénients.....	56
6.2.3. Les inconnus .....	57
6.3. Les surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie .....	58
6.3.1. Les avantages.....	59
6.3.2. Les inconvénients.....	59
6.3.3. Les inconnus .....	59
6.4. Les nanotechnologies.....	60
6.4.1. Les avantages.....	60
6.4.2. Les inconvénients.....	61
6.5. Les couts et les rendements .....	62
6.6. Le déroulement des essais .....	66
7. RECOMMANDATIONS .....	67
7.1. Les aspects législatifs.....	67
7.2. Les aspects opérationnels .....	68
7.3. Les aspects internationaux .....	69
CONCLUSION .....	71
RÉFÉRENCES .....	72

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 :	Les différentes couches de biofilm .....	4
Figure 1.2 :	Une coque non protégée par un recouvrement antisalissure .....	6
Figure 1.3 :	Les paquebots sont très vulnérables à cette problématique .....	7
Figure 1.4 :	Graphique présentant l'évolution de la relation entre l'augmentation de la rugosité et la variable de Reynold.....	8
Figure 1.5 :	Âges des navires selon leurs emplacements géographiques et le type de bateau .....	13
Figure 1.6 :	Exemple de fonctionnement des peintures antisalissures à base de TBT .....	20
Figure 1.7 :	Exemple de peintures antisalissures utilisant le principe de la matrice de retient .....	21
Figure 2.1 :	Les scénarios analysés de l'IMO planifient une fourchette de croissance possible des émissions de CO2 .....	25
Figure 2.2 :	La consommation de carburant de la flotte mondiale selon trois sources.....	26
Figure 2.3 :	Cette figure représente la comparaison des différents modes de transport en fonction des émissions de GES par unité de tonne par kilomètres.....	27
Figure 2.4 :	Les volumes transportés annuellement transitant par le port de Montréal sont en hausse constante .....	28
Figure 2.5 :	L'évolution des volumes annuels transportés par voie maritime .....	29
Figure 2.6 :	Le nombre et le tonnage des navires accostant au port de Montréal .....	29
Figure 2.7 :	L'historique des navires au port de Montréal.....	30
Figure 3.1 :	Les niveaux de menaces affectant la Grande Barrière de corail en Australie.....	35
Figure 3.2 :	La matrice décisionnelle du guide de protection des eaux du gouvernement de l'Australie .....	37
Figure 3.3 :	Les intrants de cuivre dans les eaux de surface de Suède selon une étude de 2011 .....	39
Figure 3.4 :	Les concentrations maximales de cuivre approuvées dans les produits antisalissures par les autorités suédoises .....	40
Figure 3.5 :	Les différentes parties prenantes impliquées dans la gestion des eaux baltiques en Suède .....	41
Figure 3.6 :	Les bassins de Suède ont servi de limites pour définir les autorités locales (les ' <i>water Authorities</i> ' de la figure 3.5) .....	42
Figure 6.1 :	Le fonctionnement et le positionnement d'un système cathode et anode sur un navire...	52
Figure 6.2 :	Photo d'une anode de zinc sur un navire de moins de 24 mètres de longueur.....	52
Figure 6.3 :	Les potentiels électriques requis afin de protéger divers métaux .....	54
Figure 6.4 :	Les courants requis pour la protection de l'acier dans divers milieux. ....	54
Figure 6.5 :	Le fonctionnement d'une surface liquide .....	55
Figure 6.6 :	L'application d'un revêtement de surface liquide .....	56
Figure 6.7 :	Les régions où les essais des produits simulant une surface liquide ont eu lieu.....	57
Figure 6.8 :	Les céramiques empêchent l'adhérence des microorganismes sur la coque en rendant la paroi totalement lisse .....	58
Figure 6.9 :	Le mode d'action des nano particules.....	60

Figure 6.10 :	La comparaison du nombre de colonies sur d'un panneau d'acier avec trois types de recouvrements .....	61
Figure 6.11 :	Les couts en fonction des efficacités.....	62
Figure 6.12 :	La performance des recouvrements actuellement présents sur les navires au niveau mondial .....	64
Figure 6.13 :	Les économies potentielles générées après cinq années d'utilisation des diverses méthodes antisalissures (en dollars américains) .....	64
Figure 6.14 :	Un banc d'essai pour l'acquisition de résultats sur une coque de bateau .....	66
Tableau 1.1 :	Les événements en séquence chronologique dans le développement des produits antisalissures .....	17
Tableau 6.1 :	Exemples d'applications technologiques dont les couts ont été évalués .....	63
Tableau 6.2 :	Les descriptions et les technologies.....	65

## LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

CDP	<i>controlled depletion polymer</i>
CFU/cm <sup>2</sup>	Le nombre de colonies de microorganismes formées par unités ( <i>colony-forming unit</i> ).
CNRTL	Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
CUFE	Centre universitaire de formation en environnement et développement durable
EEE	Espèces exotiques envahissantes
ECHA	European Chemicals Agency
FRC	<i>fouling release coating (silicone)</i>
GES	Gaz à effet de serre
HARD MATRIX	Matrice rigide et poreuse libérant un agent chimique
ICCT	International Council on Clean Transportation
IEA	<i>International Energy Agency</i> ou l'Agence internationale de l'énergie
IMO	<i>International Maritime Organization</i> ou l'Organisation maritime internationale
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
SPC	<i>self-polishing copolymer</i>
TBT	Tributylétains
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture



## LEXIQUE

Amphiphile	<p>« Amphipathique, amphiphile et amphipolaire, termes synonymes, désignent une molécule (en général organique) portant à la fois un groupement hydrophile (pouvant se lier à l'eau) et un groupement hydrophobe (« qui n'aime pas l'eau »).</p> <p>Ces molécules sont des tensioactifs, en ce qu'ils modifient la tension superficielle entre deux milieux. Les composants actifs des lessives et des savons sont des molécules amphipathiques, dont on exploite la double solubilité, dans l'eau (grâce aux groupements hydrophiles) et dans les milieux gras (grâce aux groupements hydrophobes). » (Futura Sciences, s.d.)</p>
Antisalissure	<p>« Se dit d'un produit ayant la capacité de protéger la carène des embarcations et les parties immergées de constructions maritimes sur lesquelles on l'applique contre le développement des organismes marins »</p> <p>(Office québécois de la langue française, 2016)</p>
Biocide	<p>« Se dit de tout produit chimique utilisé pour détruire certains organismes vivants, comme les pesticides et les herbicides. » (Larousse, 2018a)</p>
Biofilm	<p>« Groupe de microorganismes formant une mince couche sur une surface, principalement en milieu aqueux. Les biofilms sont des structures très stables. » (Antidote, s.d.)</p>
Ductile	<p>« Qui peut s'étirer sans se rompre » (Office québécois de la langue française, s.d.)</p>
Fragile	<p>« Qui, par nature, peut être facilement brisé » (CNRTL, s.d.)</p>
HARD MATRIX	<p>Matrice rigide et poreuse libérant un agent chimique</p>
Poix	<p>« Mélange mou et collant, à base de résines et de goudrons végétaux, obtenu par distillation de bois résineux ou de térébenthine. » (Larousse, 2018b)</p>
Tributylétain	<p>« Le tributylétain est un composé chimique appartenant à un sous-groupe de la famille des organostanniques. Ce sont les actifs principaux des biocides, utilisés pour contrôler un large éventail d'organismes. Ils sont utilisés, entre autre, dans des produits pour le traitement du bois, dans les peintures antisalissures pour leur propriétés fongicides, dans les textiles et les eaux industrielles, dans les fabriques de pulpe de papier et dans les brasseries. » (EXTOXNET, 1996)</p> <p>La composition chimique du tributylétain est telle que : <math>(n-C_4H_9)_3Sn-X</math> (Brignon, 2005)</p>

## INTRODUCTION

L'industrie du transport maritime est en augmentation constante depuis les cinquante dernières années. (UNCTADstat, 2017) Cette croissance rapide est attribuable à trois principaux facteurs, soit l'augmentation du nombre de navires, l'accroissement des volumes transportés et à des distances toujours plus lointaines, ce qui contribue à la hausse de l'indicateur tonne par kilomètre transportés chaque année. Une telle augmentation des navires marchands est principalement causée par la croissance de la demande et par l'accélération du rythme de la croissance. Les statistiques de l'évolution du transport maritime indiquent que non seulement les bateaux sont plus nombreux sur les eaux, mais que les distances parcourues par les marchandises ne cessent de s'étendre. (Vigarié, 1983), (Dimitrova, 2010) et (United Nations Conference on Trade and Development, 2017) Or, le contexte économique actuel prônant une meilleure efficacité des opérations et des ressources, le transport maritime est confronté à des défis propres à ce domaine d'activité. Ainsi, une problématique qui sévit depuis toujours (la section 1.2 sera consacrée à faire l'historique des technologies utilisées) est la colonisation des coques des bateaux par les organismes marins, depuis l'époque antique jusqu'à nos jours. Cette réalité entraîne diverses conséquences négatives, dont le transport d'organismes envahissants, une perte d'efficacité des navires et une durée de vie réduite pour les coques. L'une des méthodes les plus répandues afin de réduire ces inconvénients est d'appliquer une substance antisalissure sur les coques. Le terme antisalissure se définit tel que :

« Se dit d'un produit ayant la capacité de protéger la carène des embarcations et les parties immergées de constructions maritimes sur lesquelles on l'applique contre le développement des organismes marins »

(Office québécois de la langue française, 2016)

Cependant, la composition chimique de ces produits est en constante évolution au fur et à mesure que les impacts environnementaux des composés sont étudiés et que l'ampleur des effets néfastes dans plusieurs des cas deviennent connus. Actuellement, les gouvernements (surtout européens) légifèrent sur ces substances antisalissures (ECHA, sda) et diverses solutions alternatives sont sous essai (Transport Canada, 2018b). À ce jour, aucune solution durable, c'est-à-dire une solution ne comportant aucun impact ou des impacts minimaux pour les milieux aquatiques, ne semble encore avoir été identifiée.

Ces impacts sont d'autant plus importants puisqu'ils s'additionnent aux pressions anthropiques déjà en place telles que la destruction des littoraux, la surexploitation des ressources vivantes et non vivantes aquatiques, le rejet de polluants et de déchets et plusieurs autres. (R. Amara, 2010)

C'est dans ce contexte et sous l'optique du bannissement progressif des substances nuisibles pour l'environnement (ECHA, sdb) que la recherche s'intensifie afin de trouver une solution durable à ce

problème concret du milieu maritime. Dans la réalité, les produits antisalissures étant utilisés dans un domaine d'activité très compétitif, le facteur économique se doit d'être considéré. Incidemment, les solutions envisagées doivent permettre une amélioration de la situation, tant sur le bilan environnemental que sur les bilans énergétiques, techniques et financiers.

D'autre part, les navires étant mobiles, les embarcations doivent se conformer aux législations en place en fonction des différents pays. Un regard sera ainsi posé afin de prendre connaissance des exigences du Canada ainsi que des lois internationales d'un point de vue environnemental concernant ces produits antisalissures. De plus, puisque le principal cours d'eau du Québec est le fleuve Saint-Laurent (MDDELCC, 2018) composé d'eau douce, une réflexion toute particulière sera accordée aux eaux douces par rapport aux eaux salées.

Évidemment, les impacts des substances utilisées étant non négligeables, la pertinence ou la motivation de protéger les milieux marins varient d'une région à l'autre, en fonction des nécessités (par exemple, alimentaire) ou afin d'assurer la pérennité des milieux aquatiques. C'est dans cette vision que s'inscrivent les grands axes de recherches des gouvernements qui essaient de limiter les conséquences de l'utilisation des produits antisalissures sous leurs juridictions. D'autre part, des essais se déroulent sporadiquement afin de trouver les formulations chimiques qui correspondent le mieux aux besoins maritimes locaux (HOYT GORMAN, 2014), c'est-à-dire que la recherche continue d'avoir lieu afin de découvrir les revêtements qui permettront d'être appliquée sur les coques des navires tout en étant respectueuse de l'environnement immédiat.

Pour des raisons pratiques, les navires considérés dans cet essai sont les navires marchands soit les navires de jauge brute de plus de 400 tonnes métriques ou de plus de 24 mètres de longueur. Ce sont les exigences fédérales qui obligent ces types de navires à avoir un certificat de conformité ou une auto-déclaration concernant les produits antisalissures, selon le Règlement sur la pollution par les bâtiments et sur les produits chimiques dangereux - DORS/2012-69, section 8.

Concernant l'emphase mise strictement sur les navires de plus de 24 mètres, ce choix de l'auteur est attribuable à divers facteurs. Le premier facteur est l'impact des navires où les navires commerciaux ont des exigences opérationnelles demandant une efficacité maximale. En effet, les navires commerciaux requièrent une efficacité maximale, car ils sont toujours en déplacement, en comparaison avec les navires de plaisance ou de loisir qui sont utilisés sporadiquement. Incidemment, pour les bateaux de plaisance, le rendement du profilé de la coque n'est pas un enjeu majeur. Le deuxième facteur est la nature des trajets où les bateaux marchands voguent à travers le monde et où la notion d'introduction d'organismes étrangers aux milieux aquatiques se pose alors que les navires de plaisance ne quittent que très rarement

la région géographique locale. Par exemple, une embarcation de plaisance n'a pas comme objectif la traversée des océans ni de parcourir de longues distances traversant des frontières.

L'essai s'inscrit dans une approche systémique où des produits antisalissures seront analysés. Ces impacts peuvent être tout autant positifs que négatifs. Une revue de littérature des analyses faites à ce jour sera présentée afin de valider les aspects critiques des substances antisalissures et des conséquences mesurées. Ces aspects constitueront la base de réflexion concernant les produits en développement et les recommandations que l'auteur de cet essai préconise afin de réduire les conséquences environnementales suite à l'utilisation de ces produits.

Les informations tout comme les sources présentées dans cet essai proviendront de sources fiables et vérifiables. Les références d'institutions, telles que les entités gouvernementales ou les publications universitaires seront favorisées afin de conserver la rigueur demandée pour un tel exercice. L'intérêt de l'essai est de comprendre dans quelles mesures l'utilisation de produits antisalissure peut être compatible avec la volonté de maintenir un développement durable et quelles seraient les contraintes liées à cette utilisation.

## 1. MISE EN CONTEXTE

En premier lieu, le biofilm est de composition organique où les organismes marins tendent à recouvrir le maximum de surfaces immergées. Ces surfaces, qu'elles soient fixes ou mobiles, représentent une surface colonisable. Bien que cette colonisation ne soit pas immédiate, certaines études ont démontré que la colonisation varie en fonction de la température de l'eau, de la composition de l'acier et de l'eau, etc. Ce délai varie en fonction des critères de grosseur des organismes marins colonisateurs, mais il est possible de constater une présence bactérienne dès sept jours jusqu'à un délai de quarante-deux jours pour une colonisation complète. (Mattila, Carpen, Hakkarainen et Salkinoja-Salonen, 1997)

D'un point de vue microscopique, il ne faut pas voir le biofilm comme une entité homogène. En effet, en se référant à la figure 1.1, il est possible de constater que la couche organique est composée de plusieurs organismes fort différents, que ce soit du point de vue cellulaire ou de la taille des spécimens. Ainsi, les espèces transportées par la coque d'un navire ne sont pas toujours visibles à l'œil humain, mais les effets de cette couche additionnelle sur le navire ont néanmoins des impacts perceptibles, tant pour les navires que pour les localités portuaires.



Figure 1.1 : Les différentes couches de biofilm (tiré de : Selim et al., 2017).

Une salissure de coque de navire se compose traditionnellement de trois couches, soit la couche ou film primaire, la microcouche et la macrocouche. Or, le processus de création du biofilm se fait par phases où la première couche ou film primaire, se compose majoritairement de :

« macromolécules organiques (exopolymères, glycoprotéines, acides humiques) et/ou inorganiques présentes dans le milieu ou sécrétées par les microorganismes vivant dans ce milieu, puis de bactéries et ensuite de macroorganismes. La phase de fixation des organismes de plus grande taille, les macrosalissures (essentiellement constituées d'invertébrés sessiles et d'algues macroscopiques) est toujours postérieure même si la première étape de microsaliures ne semble pas toujours indispensable. Le film primaire est essentiel, car c'est lui qui, en modifiant certaines propriétés de surface (tension de surface, énergie libre de surface, polarité, mouillabilité) du matériau, conditionne l'attachement ultérieur des bactéries. » (Compere, 1999)

En résumé, le film primaire correspond à la fondation ou l'encrage du matériel organique ce qui permet l'attachement des couches subséquentes par le conditionnement des propriétés physiques de la coque, notamment la tension de surface. Cette couche est obligatoire afin de permettre la création d'un milieu d'implantation propice aux couches subséquentes. La microcouche correspond à l'attachement de bactéries sur le film primaire. Finalement, la macrocouche correspond à l'attachement d'organismes plus complexes tels des algues voire des moules.

### **1.1. Les fonctions techniques des revêtements**

Les substances antisalissures sont principalement utilisées afin d'empêcher les microorganismes d'adhérer aux coques des navires. Or, une fois que les microorganismes se sont attachés sur la coque, cela entraîne diverses répercussions affectant le comportement des navires et sur leur longévité.

À la figure 1.2, il est possible de constater l'adhésion des microorganismes à la coque de la chaloupe. Cette situation résulte de la création d'un biofilm sur la coque de l'embarcation. Les substances antisalissures ont pour principal objectif d'empêcher l'agglomération des organismes.



**Figure 1.2 : Une coque non protégée par un recouvrement antisalissure (tiré de : Australia, 2010).**

À la figure 1.3, l'adhésion de microorganismes sur la coque de bateau marchand représente un réel défi pour la maintenance. Les surfaces à considérer pour ce type d'embarcation sont non négligeables et requièrent temps et argent régulièrement pour l'entretien régulier. Les produits antisalissures représentent un avantage opérationnel lors de la phase de restauration du navire.



**Figure 1.3 : Les paquebots sont très vulnérables à cette problématique** (tiré de : Wikipedia, s.d.).

Outre des avantages indéniables pour le maintien du navire, les effets positifs des produits antisalissures permettent des avantages opérationnels appréciables. Ces avantages seront présentés dans les prochaines sections de ce chapitre.

### **1.1.1. La perte d'aérodynamisme des coques et la surconsommation de carburant**

La prochaine section fera référence aux connaissances transmises par le livre *Fundamentals of Fluid Mechanics* qui est un ouvrage reconnu pour l'enseignement universitaire en ingénierie.

En aérodynamisme, le concept de perte d'aérodynamisme se traduit par la création d'une 'trainée' représentée par l'équation :

$$C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A = D$$

Où les coefficients sont :

$C_D$  = le coefficient de trainée

$D$  = la trainée ou la force qui s'oppose au mouvement

$\rho$  = la densité du milieu ambiant

$V$  = la vitesse



A = l'aire de résistance de l'objet

Ainsi, lors de l'application d'un produit antialissure, seul le paramètre  $C_D$  varie. Or, le paramètre  $C_D$  est tributaire des paramètres :

$$C_D = \phi(\text{forme}, Re, Ma, Fr, \varepsilon/l)$$

Où les variables sont :

Forme

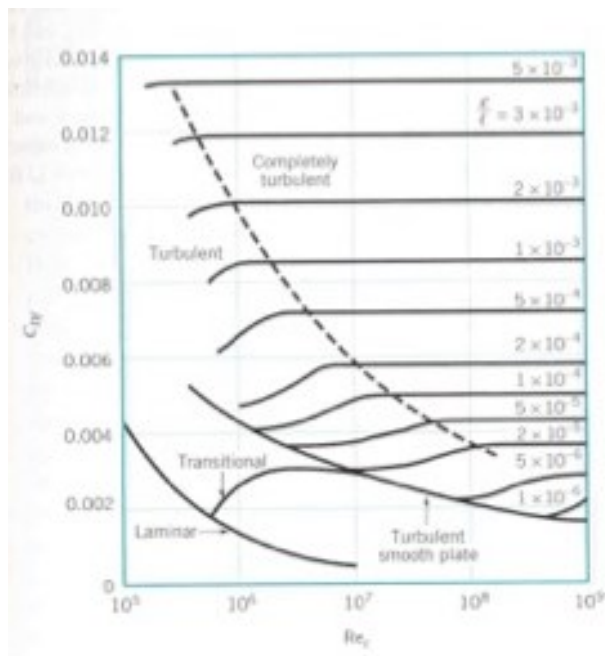
Re = nombre de Reynold

Ma = ratio en fonction de la vitesse du son

Fr = nombre de Froude qui varie en fonction de la du débit et de la forme de l'objet

$\varepsilon/l$  = la rugosité relative de la surface par rapport à la longueur

En considérant l'ensemble des variables constantes à l'exception de la rugosité, il est possible d'obtenir le graphique suivant qui regroupe le  $C_D$ , le nombre de Reynold et le  $\varepsilon/l$  :



**Figure 1.4 : Graphique présentant l'évolution de la relation entre l'augmentation de la rugosité et la variable de Reynold (tiré de : Munson, Young et Okiishi, 2006).**

Les formules démontrent que l'augmentation de la rugosité de la surface des coques engendre une perte substantielle de l'aérodynamisme et incidemment, les forces de trainée produisent des inefficacités.

Par ailleurs, les équations présentées précédemment font référence à des coefficients de rugosité, de trainée, etc. Or, que ce soit dans un milieu tel que l'air ou un milieu aquatique tel que l'eau, la dynamique des fluides s'applique puisque les milieux ont des comportements semblables dans la plage d'utilisation de navires, c'est-à-dire à basse vitesse par rapport à la vitesse du son (donc, maintien du facteur d'incompressibilité du milieu) et exclut les fluides non newtoniens.

Un fluide non newtonien est un liquide dont la viscosité varie en fonction de la force exercée. Cette viscosité peut augmenter ou diminuer selon la composition chimique. Parmi ces liquides non newtoniens, la pâte à dent est un exemple où la pression occasionne une baisse de la viscosité et donc un mouvement hors du tube de dentifrice possible. Un autre exemple est le sable mouillé qui s'écoule entre les doigts, mais qui s'oppose à une force appliquée soudainement.

#### **1.1.2. La surconsommation de carburant**

Les inefficacités d'aérodynamisme sont synonymes de deux effets, soit le ralentissement de la vitesse des navires pour une consommation donnée ou soit une augmentation de la consommation de carburant pour conserver la vitesse initialement prévue. En se basant sur les équations de la dernière section, il est possible d'affirmer que la première situation engendre une augmentation de carburant et que la seconde situation augmente davantage la consommation énergétique.

À cause des raisons opérationnelles des compagnies de transport, la seconde situation est privilégiée afin de respecter les horaires anticipés et de maximiser le nombre de déplacements et intrinsèquement, de réduire les temps de déplacements.

La consommation de carburant étant tributaire de plusieurs facteurs, notamment le type de navire, la forme de la coque, la charge transportée, les courants marins traversés, etc. il est impossible de définir avec exactitude la surconsommation. Pour avoir une échelle de grandeur de cette valeur, une expérimentation dans des conditions réelles est inévitable. Or, une telle expérience a été menée en 1995 et 1996 par un groupe de chercheurs qui se sont penchés sur le cas réel d'un catamaran qui servait alors de traversier. Ce navire est comparable, de par sa taille, aux navires de transport de marchandises. La vitesse usuelle de l'embarcation se situait aux alentours de 33 nœuds (+/- 61 kilomètres par heure). (Candries, Anderson et Atlar, 2001) C'est une vitesse relativement élevée pour un véhicule nautique, mais

réaliste. Par comparaison, le gouvernement fédéral canadien a limité la vitesse de navigation dans le fleuve Saint-Laurent à de 10 nœuds (+/- 18,5 kilomètres par heure) (Cantin, 2014) afin de protéger les espèces maritimes dont notamment les baleines noires. Les vitesses usuelles des paquebots sont plus élevées que 10 nœuds et même si un tel moratoire est légiféré, des navires récalcitrants ont été sanctionnés pour excès de vitesse. (Gagné, 2018)

Ainsi, les mesures recensées entre l'année de référence et l'année où la coque avait son recouvrement antisalissure ont permis de relever que :

- La vitesse a été plus élevée de 2 à 3 nœuds avec le recouvrement
- La consommation de carburant a été inférieure de 12 % par rapport à une coque non protégée

Ce 12 % de réduction représente approximativement 20 000 litres par mois de moins pour le catamaran qui servait de traversier! (Candries et al., 2001) C'est une économie opérationnelle appréciable et non négligeable pour une entreprise de transport. En comparaison les marges bénéficiaires moyennes déclarées des transporteurs maritimes canadiens en 2016 étaient d'environ 20 % (Statistique Canada, 2018).

Une autre étude a démontré des résultats similaires, soit une augmentation drastique des forces de trainée et une augmentation de la consommation de carburant engendrée par la sollicitation plus importante du moteur afin de maintenir la vitesse de croisière. (Schultz, 2007) Dans son expérience, Schultz fait l'analyse mathématique des forces engendrées par l'addition de la biopellicule sur la coque du navire. Évidemment, c'est à la vitesse la plus élevée que l'effet de trainée se fait ressentir. Incidemment, la valeur maximale mesurée avec les modèles réduits démontre un besoin additionnel de 86 % de la force du moteur afin de conserver la vitesse de croisière initiale lorsque la coque est recouverte de biofilm. Ce besoin de puissance additionnel résulte, bien évidemment, en augmentation proportionnelle de la consommation de carburant.

La différence obtenue entre les deux études, soit une consommation accrue de 12 % alors que la seconde expérimentation conclut à une force additionnelle de 86 % pour maintenir la vitesse, est la résultante des réalités opérationnelles des deux bateaux. Alors que dans le premier cas, le traversier est un bateau de grande envergure et où la vitesse de croisière est moyenne, la seconde étude portait sur un navire de guerre américain de taille moyenne qui a par définition une coque plus effilée et des vitesses d'opérations plus élevées. Ainsi, l'augmentation de la trainée créée par la création d'une biocouche sur le premier navire affecte les performances plus marginalement que dans le deuxième cas où la forme de la coque est optimisée pour offrir le moins de résistance possible. Ainsi, dans le deuxième cas, une hausse

de la trainée affecte davantage la surconsommation de carburant que dans la première expérience présentée.

Ces deux analyses de cas représentent une surconsommation appréciable de carburant et autant de gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère. Selon les dernières statistiques disponibles, le nombre de navires commerciaux recensé à travers le monde dépasserait les 93 161 unités en 2017! (United Nations Conference on Trade and Development, 2017) Ainsi, l'avantage d'utilisation des produits antisalissure résulte en une réduction de consommation de carburant qui a un impact indéniable sur le bilan carbone du transport maritime.

D'un point de vue mondial, l'Organisation maritime internationale (IMO) évaluant en 2014 que tout en procédant à une maintenance de nettoyage et de réapplication de produits antisalissures aux cinq ans, la résistance moyenne de la flotte mondiale de navires approximait les 9 % (IMO, 2015).

Également, selon un rapport de l'IMO, les protections antisalissures permettent, au niveau mondial, une économie de carburant de l'ordre de 60 milliards de dollars par année, un évitement annuel d'émission de dioxyde de carbone de 384 millions de tonnes et de 3,6 tonnes de dioxyde de soufre (IMO, 2009).

### **1.1.3. La longévité des coques des bateaux**

Les coques des navires marchands sont usuellement faites d'acier, où la composition de l'acier inclut une teneur élevée de fer. Or le fer, au contact de molécules d'eau, a tendance à l'oxydation. Pour pallier à ce comportement chimique naturel qu'est l'oxydation, les coques des navires peintes afin de protéger les coques, cette partie essentielle des bateaux. Puisque la réaction chimique est dépendante de plusieurs facteurs, notamment, la surface d'exposition à l'eau, la salinité et la composition des ions en suspension dans l'eau, la température voire même l'entretien périodique fait sur les coques, etc., il est impossible de faire une statistique sur la durée de vie strictement basée sur les coques métalliques.

Cependant, les produits antisalissures, lorsqu'appliqués sur les coques, ont davantage de rôles que de seulement protéger la partie navire en contact avec l'eau de l'oxydation. En effet, plusieurs fonctions sont remplies dont en autres :

- Empêcher la création d'un biofilm sur la coque du navire
- Ne pas provoquer de bruit lors du frottement avec les vagues
- Être viable économiquement

- Être durable dans le temps (permettre d'allonger les temps d'opérations entre les besoins de maintenance)
- Avoir une forte adhérence aux parois de la coque
- Avoir une bonne résistance mécanique
- Réduire la force de trainée

(Lindholdt, Dam-Johansen et Kiil, 2015)

D'autre part, un rapport paru en 2007 faisait un vaste portrait de la flotte mondiale en ce qui a trait à l'âge des navires. Dans ce rapport, les auteurs stipulent que l'intérêt de conserver un navire plutôt que de changer pour un nouveau bateau est la résultante de multiples facteurs. Parmi ces facteurs, la plupart des points reposent sur les caractéristiques des navires plutôt que sur le bon état des composantes des navires.

Par exemple, les facteurs déterminants pour motiver un changement de navire sont :

- L'obsolescence de la technologie embarquée
- L'adaptation de la flotte aux besoins du marché
- La hausse des coûts d'exploitation / maintenance trop onéreuse
- Le manque de fiabilité / perte de la qualité du service rendu au client

(Le Pensec et Pinon, 2007)

Or, face au vieillissement du temps, tous les navires ne sont pas égaux. En effet, quoiqu'il n'existe pas de norme internationale contraignante concernant la durée de vie des navires, l'âge des navires varie grandement selon les emplacements géographiques :

- 10,5 ans dans les pays développés
- 11,8 ans dans les pays de libre immatriculation
- 13,1 ans dans les pays en développement ne faisant pas la libre immatriculation
- 20,5 ans dans les pays d'Europe centrale et orientale
- 16,8 ans dans les pays socialistes d'Asie

Le tout pour donner une moyenne mondiale de 12,3 ans. (Le Pensec et Pinon, 2007)

En recoupant les types de bateaux et l'âge selon les régions, il est possible d'obtenir la matrice suivante.

	Pétroliers	Vraquiers	Porte-conteneurs	Cargos classiques	Autres	Moyenne générale
<b>Pays développés éco. de marché</b>	8,5	12,3	9,4	17,5	14,2	10,5
<b>Pays de libre immatriculation</b>	10,2	12,6	9,2	16,4	15,5	11,8
<b>Europe centrale et orientale</b>	18,3	22,9	18,1	20,8	20,0	20,5
<b>Pays socialistes d'Asie</b>	15,8	18,4	12,3	20,9	13,4	16,8
<b>Autres pays en développement</b>	11,5	13,3	9,3	18,6	16,9	13,1
<b>Moyenne mondiale</b>	10,3	13,0	9,4	17,5	15,6	12,3

**Figure 1.5 : Âges des navires selon leurs emplacements géographiques et le type de bateau** (tiré de : Le Pensec et Pinon, 2007).

De plus, certaines législations demandent des inspections plus rigoureuses ou des surveillances renforcées lorsque les navires passent un certain âge. Par exemple, les pays de l'Union européenne obligent des inspections systématiques aux navires suivants :

- Pétroliers et navires à passagers de plus de 15 ans
- Chimiquiers et gaziers de plus de 10 ans
- Vraquiers de plus de 12 ans

(Armateurs de France, 2017)

Ces obligations sont surveillées et obligatoires. Ainsi, la Commission européenne a pris action contre certains de ses membres afin de faire respecter les obligations d'inspections mises en place. (European Commission, 2003)

Par comparaison, la durée de vie utile d'un navire militaire est approximativement de 30 ans pour la marine militaire française (Service d'informations et de relations publiques des armées Marine, 2013).

#### **1.1.4. Le déplacement des espèces exotiques envahissantes (EEE)**

Tel que mentionné précédemment, les biofilms sont constitués de sécrétions d'origine biologiques. En s'attachant aux coques des navires, ceux-ci sont des passagers involontaires lors des déplacements des

bateaux. Or, si les embarcations de plaisance ne voguent généralement pas sur de longues distances, les bateaux marchands traversent le globe, emportant par le fait même la cargaison d'agent biologique attaché à sa coque. De là l'intérêt de l'auteur pour se concentrer sur les navires de plus de vingt-quatre mètres de long.

Ce vecteur de migration des espèces exotiques envahissantes (EEE) est connu depuis fort longtemps des autorités canadiennes où une liste des espèces étrangères introduites dans les eaux canadiennes est sporadiquement mise à jour et où la datation des premières apparitions d'EEE remonte avant 1900 (Transport Canada, s.d.).

Les statistiques gouvernementales étant plus complètes concernant les Grands Lacs, ce seront ces données qui seront présentées dans cet ouvrage, mais puisque les Grands Lacs ont un lien direct avec le fleuve Saint-Laurent, il faut considérer ces deux étendues d'eau comme un seul écosystème et non pas comme des systèmes isolés.

Entre 1810 et 1959, plus de 90 espèces non indigènes ont été recensées dans le bassin des Grands Lacs. Pour la période correspondante entre 1960 à 1990, 43 nouvelles espèces étrangères y ont été inventoriées. Au total, c'est plus de 170 espèces exotiques envahissantes qui ont colonisé les Grands Lacs. (Transports Canada, 2010a)

Les EEE sont des organismes marins de toutes sortes. En effet, sur la liste gouvernementale, il y figure :

- Des algues
- Des plantes
- Des invertébrés
- Des poissons

Une espèce dont l'arrivée a eu un impact significatif dans les Grands Lacs tout comme dans le fleuve Saint-Laurent est la moule zébrée ou *Dreissena polymorpha*. Cette dernière a été observée pour la première fois en 1989 dans le fleuve Saint-Laurent (Transport Canada, s.d.). Or, plusieurs caractéristiques de l'espèce contribuent à sa propagation dans les eaux canadiennes. Un milieu favorable, l'abondance de nourriture et l'absence de prédateurs naturels ont notamment contribué à son implantation. (Centre Saint-Laurent, 2000) Cependant, la multiplication rapide et l'abondance de cette moule occasionnent de nombreux problèmes dont notamment le blocage des conduites de prise d'eau des usines. Les entités les plus concernées par cette réalité sont les industriels pompant leur eau des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent et les stations de traitement de l'eau pour qui les coûts

d'exploitation annuels ont augmenté appréciablement. Par exemple, *Ontario Power Generation*, qui est la principale compagnie pour la production et la commercialisation d'électricité de l'Ontario, a des dépenses additionnelles récurrentes de près de 44 millions annuellement. Également, les dépenses totales engendrées par cette moule ont été estimées à plus de 5 milliards de dollars pour l'ensemble des collectivités, des entreprises et des industriels. (Transports Canada, 2010a) Les données les plus récentes font état de dépenses annuelles d'entre 75 et 91 millions annuellement pour l'ensemble de l'Ontario seulement. Ces coûts incluent les dépenses pour la formation, l'éducation, maintenance des équipement, réparation, etc. (Truite Illimité Canada, 2016) et (Greenslade, 2015)

Cette capacité des EEE de se déplacer et de migrer en se collant aux coques des navires est un vecteur de déplacement qui implique l'introduction d'une nouvelle espèce, mais aussi qui ajoute de la pression biologique sur l'écosystème local. (Lee, Gregorich, Kavanagh, Hovorka et Canadian Wildlife Service, 2003)

Dans le cas des moules zébrées, il a été estimé qu'il est impossible d'éradiquer leur présence dans les Grands Lacs et dans le fleuve Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent, 2000). Or, les coûts récurrents ainsi que les énergies nécessaires afin de contrôler cette propagation accaparent les ressources limitées des gouvernements.

Globalement, au Canada, les coûts annuels reliés à la gestion des EEE atteindraient 20 milliards de dollars pour le domaine forestier, 7 milliards de dollars pour les EEE aquatiques des Grands Lacs et 2,2 milliards de dollars pour les EEE reliées au secteur agricole. (Environnement Canada, 2012)



## 1.2. L'historique et évolution des technologies et leurs impacts environnementaux

Tel que démontré précédemment, la création d'une pellicule organique sur les coques des navires occasionne des pertes de performances notables. Or, cette problématique du monde maritime n'est pas récente. En effet, il est documenté que plusieurs essais ont eu lieu à travers les époques pour contrer ce vaste problème et qu'encore aujourd'hui, la quête se poursuit.

Une revue historique rapide permet de constater que plusieurs rapports retracent l'utilisation de matériaux divers en tant que produits antisalissures. Plusieurs ouvrages d'analyse marine font état d'observation des techniques utilisées à des époques lointaines. Par exemple, des rapports de 1952 du *Woods Hole Oceanographic Institute* (WHOI, 1952) font état de l'utilisation probable d'usage de poix et de revêtement de cuivre sur le fond de navires phéniciens et carthaginois (1200 avant J.-C.). Aussi, les débuts des écritures sur les navires britanniques font état d'utilisation de cire, de mélanges goudronnés ou de compositions d'asphaltes. (Charnock, 1801) Certaines références directement documentées attestent que les Grecs utilisaient des mélanges d'arsenic et de soufre jumelés à des huiles aux alentours de 412 avant J.-C. (Culver et Grant, 1928)

Incidemment, la problématique était connue depuis fort longtemps et aucune solution n'avait pu réellement endiguer la problématique des salissures marines. Plusieurs expérimentations ont eu lieu au cours des siècles (1800 – 1900), mais les objectifs n'étaient pas spécifiquement dirigés contre la création du biofilm. En effet, l'évolution technologique des matériaux a permis une évolution quant aux dimensions et aux performances des navires. C'est lors de cette période que les navires sont passés d'une construction en bois à une construction métallique. Or, aux balbutiements des coques en fer, plusieurs connaissances étaient à parfaire, dont notamment la science des alliages. Par conséquent, les recherches ont davantage pointé vers des objectifs de protection des coques contre la corrosion et pour allonger la longévité de vie des pièces immergées. Une démonstration de cette préoccupation est l'utilisation de zinc dans les recouvrements de bateaux. Cette approche permettait une bonne protection contre la corrosion, mais très peu comme agent antisalissure. Incidemment, le zinc plaqué sur les surfaces métalliques par polarité négative s'effritait rapidement. Un tel processus permettait une protection antisalissure causée par la désintégration rapide de la surface traitée. Les conclusions tirées de cette expérience ont démontré que l'effritement était trop rapide pour permettre une protection allongée dans le temps. Ainsi, cela n'était pas rentable financièrement et opérationnellement. (WHOI, 1952)

Pour résumer divers essais et technologies utilisés à travers le temps, le tableau 1.1 présente les principales étapes dans le développement des produits antisalissures. Ces étapes représentent tout autant des technologies que des événements ou législations qui ont eu lieu à des moments donnés.

**Tableau 1.1 : Les événements en séquence chronologique dans le développement des produits antisalissures** (tiré de : Dafforn, Lewis et Johnston, 2011).

Ligne de temps	Évènement
1500 avant J.-C. à 300 avant J.-C.	Utilisation de feuilles de plomb et de cuivre sur les navires en bois
1800 – 1900	Incorporation de métaux lourds (plomb, mercure, arsenic, antimoine, etc.) aux revêtements des coques
1800 à aujourd'hui	Utilisation du cuivre dans les produits antisalissures
1960	Développement des produits à base de tributylétain (TBT)
1974	Les fermes d'élevage d'huitres rapportent des croissances anormales des coquilles
1977	Premiers brevets dans le domaine des produits antisalissure
1980	Des études relient les anomalies constatées des coquilles d'huitres à la présence des TBT
1987~1990	Bannissement des produits à base de TBT dans certains pays pour les navires de moins de 25 mètres de longueur (France, Angleterre, États-Unis, Canada, Australie, Union européenne, Nouvelle-Zélande et Japon)
1990	Introduction des produits antisalissures à base de cuivre
Années 2000	Augmentation des recherches concernant les produits plus respectueux de l'environnement
2001	Organisation maritime internationale (IMO) adopte le bannissement des TBT
2003	Bannissement de l'application de nouveaux produits contenant du TBT
2008	Bannissement de la présence de TBT
2008	Entrée en vigueur de la <i>Convention internationale sur le contrôle des systèmes antisalissures nuisibles sur les navires</i> par l'IMO (IMO, 2018a)

Trois grandes époques ont majoritairement marqué l'histoire des produits antisalissures. La première étant l'avant-recherche scientifique où les résultats antisalissures étaient plus le fruit du hasard que d'un réel pouvoir protecteur des substances utilisées. C'est d'ailleurs sur ces conclusions que certaines expérimentations aboutirent. (WHOI, 1952)

Le premier brevet demandé pour un produit applicable antisalissure est daté de 1625 par William Beale, mais dont la composition exacte n'est pas spécifiée. La composition de la substance serait formée de poudre de fer, de ciment et les experts soupçonnent également une présence de cuivre. (WHOI, 1952)

La seconde époque se caractérise par la découverte et l'utilisation du tributylétain. C'est le premier vrai produit utilisé à grande échelle qui avait pour fonction la protection des coques contre les films d'origine organique et qui avait un impact démontrable. Or, alors que le produit gagne en popularité, les

producteurs d'huîtres en France situés dans la baie d'Arcachon voient leur élevage rencontrer divers problèmes, dont la reproduction difficile des larves, les malformations des coquilles, le sous-développement des mollusques, etc. où les impacts sont soudains (apparition en quelques années seulement) et très visibles. Les études font état de malformations des coquilles touchant 80 % à 100 % des individus étudiés avec une forte corrélation de la présence du TBT. (C. L. Alzieu, Sanjuan, Deltreil et Borel, 1986) Ces effets indésirables et les impacts directs sur les localités côtières firent en sorte que les autorités de plusieurs pays bannirent les TBT des produits approuvés dans leurs eaux nationales.

Même si aujourd'hui le TBT est banni, il réside toutefois des traces détectables dans l'environnement. En effet, les utilisations en tant que produits antisalissures étaient à usage dispersif dans l'environnement. Or, puisque les sources directes sont maintenant interdites, ce sont les sources indirectes qui émettent en relâchant dans l'environnement les molécules accumulées au fil des années. Il est ici important de préciser que la demi-vie du TBT se situe entre 360 jours dans les eaux douces et de 775 jours dans les sédiments de surface, mais qu'il se conserve plusieurs dizaines d'années dans des conditions anaérobies. (Brignon, 2005)

La troisième époque est concomitante aux deux premières, c'est-à-dire que l'utilisation du cuivre comme produit actif en tant qu'agent antisalissure est concomitante aux essais des autres technologies. Alors que le cuivre est utilisé comme revêtement à l'époque des Romains ou comme composé chimique dans divers mélanges (WHOI, 1952), les essais se sont poursuivis et se poursuivent encore aujourd'hui (Overton, 2018). Suite à l'abandon des produits à base de TBT, l'utilisation des produits à base de cuivre est en forte progression à travers le monde. Les données seront plus longuement détaillées dans le chapitre 2 de ce document.

Néanmoins, d'un point de vue environnemental, les produits à base de cuivre ne sont pas exempts d'impacts environnementaux. Alors que les compagnies marchandes se réfèrent maintenant aux produits à base de cuivre, les impacts se révèlent peu à peu et les recherches essaient de déterminer les concentrations maximales des produits afin de pouvoir réduire l'empreinte environnementale des produits à base de cuivre. (Mochida, Ito, Harino, Kakuno et Fujii, 2006) et (I. Amara, Miled, Slama et Ladhari, 2018)

Parmi les récentes études publiées, les conclusions de la présence de cuivre dans l'environnement dénotent une toxicité de ce métal pour certains types d'algues, d'invertébrés, de crustacés et de poissons. Évidemment, les concentrations pour lesquelles les êtres vivants sont affectés varient selon l'espèce. Cependant, les expérimentations sur les concentrations indiquent les observations suivantes :

- Une réduction de la croissance des plantes *Chlorella vulgaris* et *Dunaliella tertiolecta* lorsque les concentrations atteignent respectivement 4 microgrammes/L (ou 4 µg/L) et 600 µg/L. De plus, le processus de photosynthèse est altéré pour l'algue *Chlorella pyrenoidosa* lorsque la concentration dépasse les 50 µg/L. (C. Alzieu, Thibaud, Heral et Boutier, 1980)
- Les mollusques sont sensibles aux oxydes de cuivre pour des concentrations variant entre 1 mg/L à 2 mg/L (Floch, Deschiens et Lecorroller, 1964) et le développement de l'huître *Crassostrea gigas* est perturbé lorsque les concentrations sont supérieures à 50 µg/L (C. Alzieu et al., 1980).
- À de fortes concentrations, le cuivre peut tuer jusqu'à 50 % de la population de plusieurs espèces de crustacés en moins de 48 heures (C. Alzieu et al., 1980).
- Dans la famille des poissons, la dorade rouge ou *Pagrus major* voit ses chances de survies réduites de 50 % après une durée de 96 heures à une exposition de concentration de 84,4 µg/L. (Mochida et al., 2006) Par ailleurs, le phénomène de bioaccumulation est présent pour le cuivre, ce qui engendre des concentrations significatives dans les organismes mêmes si ces derniers sont soumis à de très faibles expositions. (Voulvoulis, Scrimshaw et Lester, 1999)

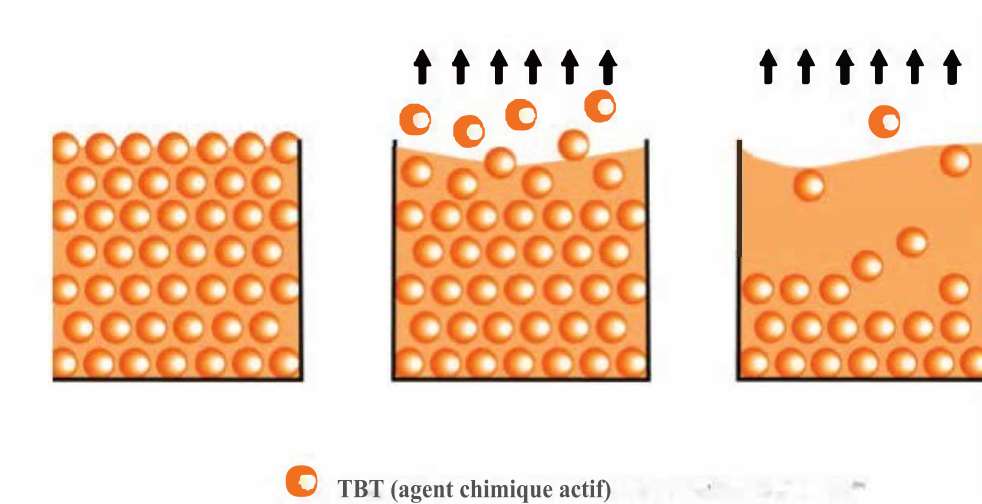
Pour avoir une comparaison des concentrations, le Règlement sur la qualité de l'eau potable du gouvernement du Québec stipule qu'une concentration maximale de 1,0 mg/L après 5 minutes d'écoulement est acceptable à être ingérée. Or, les concentrations auxquelles des effets néfastes apparaissent auprès de diverses espèces sont largement inférieures à cette limite.

### 1.2.1. Les types de technologies et des agents chimiques

Tel que vu précédemment, les deux principaux agents chimiques contenus dans les peintures antisalissures sont le TBT ou le cuivre. Cependant, le type de fonctionnement de la substance appliquée n'est pas la même. En effet, le mécanisme de libération des substances appliquées sur les coques des navires a été modifié pour la dernière génération d'antisalissure contenant du cuivre ou des composés cuivrés.

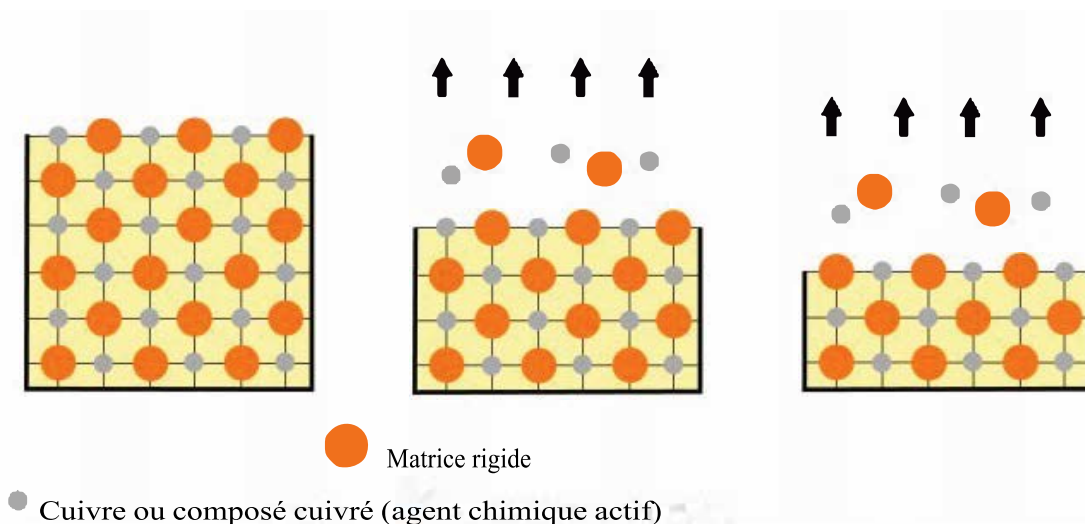
Dans le cas du TBT, la composition chimique de la peinture faisait en sorte que l'agent actif était relâché continuellement dans les eaux entourant la coque. Pour imaginer le concept, on pourrait faire la comparaison avec un glaçon qui fond lentement dans un verre d'eau. Cette technique s'avère efficace en tout temps, c'est-à-dire peu importe si le bateau est en déplacement ou s'il est à l'arrêt pour une longue

durée de temps. Le désavantage majeur est que le relâchement chimique étant continu, lorsqu'il y a stationnement de navires pour une longue période, les concentrations chimiques augmentent rapidement et les impacts sur la faune et flore sont proportionnellement en augmentation. C'est pour cela que les observations découlant des effets des TBT se sont premièrement faites dans une baie où les navires étaient à l'arrêt pour une longue période et où le renouvellement des eaux est moindre qu'en rivière ou en océan, engendrant par le fait même une hausse des concentrations des composés chimiques.



**Figure 1.6 : Exemple de fonctionnement des peintures antisalissures à base de TBT** (Inspiré de : International Maritime Organization, 2002).

La seconde technologie ou approche consiste à inclure l'agent chimique, par exemple du cuivre ou un composé cuivré, dans une matrice rigide, par exemple, une matrice de polymères. Les agents chimiques sont lentement libérés, laissant des trous dans la matrice. Cependant, lors du mouvement des navires, cette matrice s'use et se désintègre afin de laisser à découvert la seconde épaisseur moléculaire dans la substance de recouvrement contenant les agents chimiques. Le processus continu en boucle comme cela jusqu'à la disparition de la couche de protection antisalissure. Cette approche permet de réduire les émissions d'agents chimiques lors des arrêts ou du remisage des navires pour les longues durées. Toutefois la protection antisalissure n'est alors plus active, ce qui engendre par le fait même l'arrêt de la protection chimique et les coques sont assujetties à la création d'un biofilm.



**Figure 1.7 : Exemple de peintures antisalissures utilisant le principe de la matrice de retient** (inspiré de : International Maritime Organization, 2002).

Néanmoins, dans les deux cas, des améliorations chimiques telles que durcissement des matrices rigides (occasionnant par le fait même une usure moins rapide de la matrice au contact des vagues) ou une composition chimique réduisant le taux d'émission du TBT ou du cuivre permettent de réduire le taux d'émission des composés chimiques dans les eaux des navires, prolongeant du même fait la durée de vie des produits antisalissures sur les coques, mais ces durées de vie restent relativement de courte durée, variant d'un an à maximum cinq ans. Évidemment, la protection chimique offerte par ces deux techniques fluctue dans le temps, l'efficacité maximale étant lors de l'application initiale du recouvrement. (Andreae, 2014) C'est pourquoi les solutions actuelles ne sont pas éternelles et qu'un entretien périodique est nécessaire.

### 1.2.2. Les restrictions

Selon les embarcations, certains produits chimiques ne sont pas recommandés, voire vivement déconseillés. C'est notamment le cas pour l'application des produits à base de cuivre sur les navires ou les installations d'aluminium qui ont tendance à réagir en présence de cuivre. Ainsi, afin de prémunir les structures contre la dégradation chimique, il est important de bien se renseigner afin d'éviter les corrosions électrolytiques. (Andreae, 2014) et (National Physical Laboratory, 2000)

Dans un ordre plus général, la démonstration a été faite que la création d'un film d'origine organique sur les navires occasionne plusieurs problématiques. Incidemment, l'approche de laisser-aller, c'est-à-dire de ne pas protéger la coque des navires s'avère une approche peu judicieuse tant du point de vue économique que du point de vue environnemental. Or, toutes les solutions retenues à ce jour à une échelle industrielle engendrent des impacts environnementaux non négligeables, pour la faune et la flore aquatiques.

## **2. L'UTILISATION ACTUELLE DES PRODUITS ANTISALISSURES ET PRÉVISION DE LA DEMANDE FUTURE**

Les peintures antisalissures sont aujourd'hui un outil incontournable dans la productivité des navires. Tel que vu précédemment, les avantages se mesurent tant en économies de carburant et monétaires, tant pour la capacité des bateaux à conserver leurs vitesses de navigations d'origine. Or, le marché est dynamique, c'est-à-dire qu'il s'adapte aux législations des gouvernements et aux produits disponibles sur le marché.

C'est dans cette veine que s'inscrivent les mouvements de volumes consommés annuellement des produits antisalissures. Par exemple, vers la fin des années 1980 en France, les substances contenant du TBT représentaient approximativement 70 % des parts de marché. Cependant, suite aux pressions et aux changements de réglementations, cette part est maintenant nulle depuis le bannissement imposé. (Brignon, 2005)

### **2.1. L'état du marché actuel et futur des produits antisalissure**

Les données étant fragmentaires, c'est-à-dire disponibles sous formes agglomérées régionalement ou par pays, il est difficile d'avoir le portrait global des produits antisalissures. Cependant, des firmes qui évaluent les marchés en faisant des veilles de marchés estiment que mondialement, la valeur marchande des produits antisalissures est approximativement de 3,31 milliards de dollars américains. (Research and Markets, 2018) De plus, les projections de croissance de ce marché varient grandement en fonction de nombreux facteurs. Alors que certaines études anticipent une croissance équivalente à la croissance mondiale (3,5 %), certaines études misent plutôt sur une croissance de plus de 8,6 % (Markets and Markets, 2016) pour positionner la valeur du marché à 9,22 milliards en 2021.

Néanmoins, un second indicateur du marché des produits antisalissure est le volume consommé annuellement. Selon la firme *Grand View Research*, le marché annuel mondial tournerait autour de 84 400 tonnes en 2014 (Grand View Research, 2016a). Dans la même tangente, le même acteur du milieu maritime évalue le marché mondial à un volume de plus de 130 000 tonnes annuellement d'ici les sept prochaines années. (Grand View Research, 2016b) En comparaison, les volumes vendus de TBT vers le début des années 1980 étaient de l'ordre de 140 000 tonnes aux États-Unis seulement (Ebdon et al., 2007).

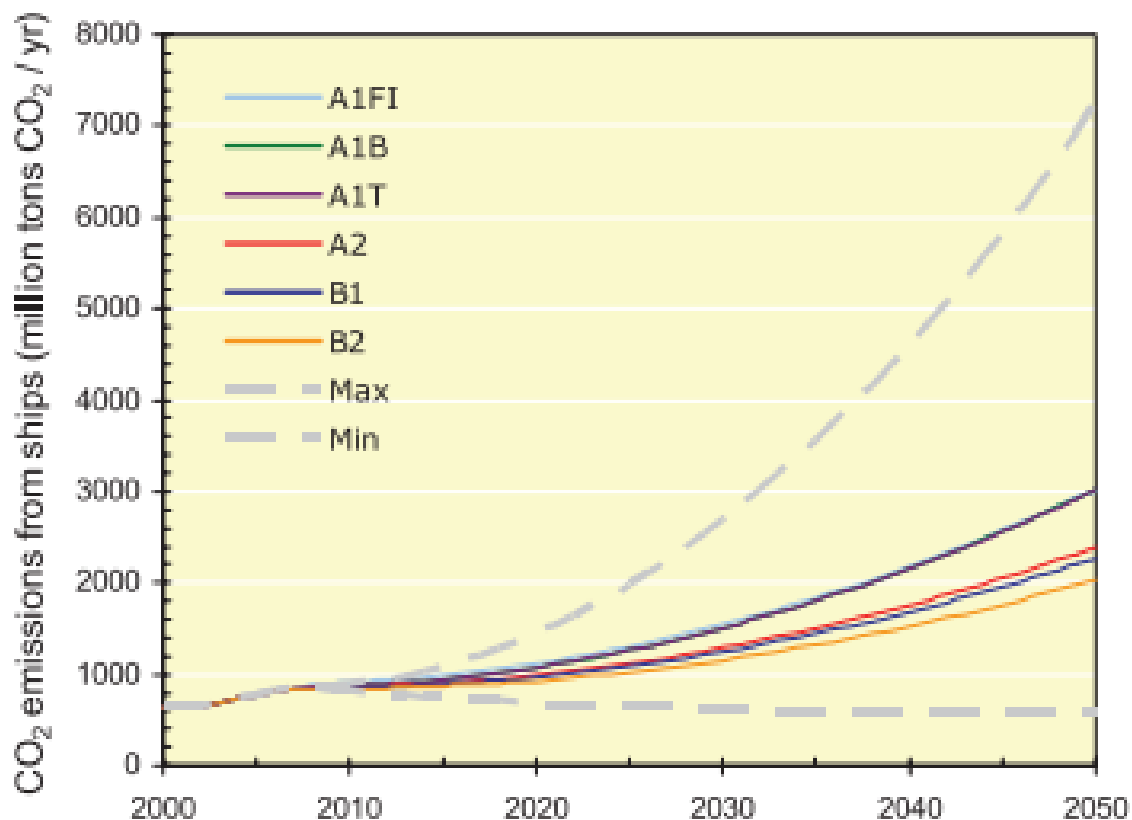


## **2.2. L'évolution du transport maritime mondial et des émissions de gaz à effet de serre**

D'un point de vue mondial, c'est en Asie où il se construit le plus de navires marchands. Les pays influençant le plus le marché sont la Chine et le Japon, et c'est d'ailleurs en Chine où se situe le plus grand nombre de cales sèches au monde. C'est d'ailleurs dans cette région où se localise la plus forte concentration de chantiers maritimes, ce qui entraîne une forte demande des produits antisalissures dans cette zone. (Pianoforte, 2015)

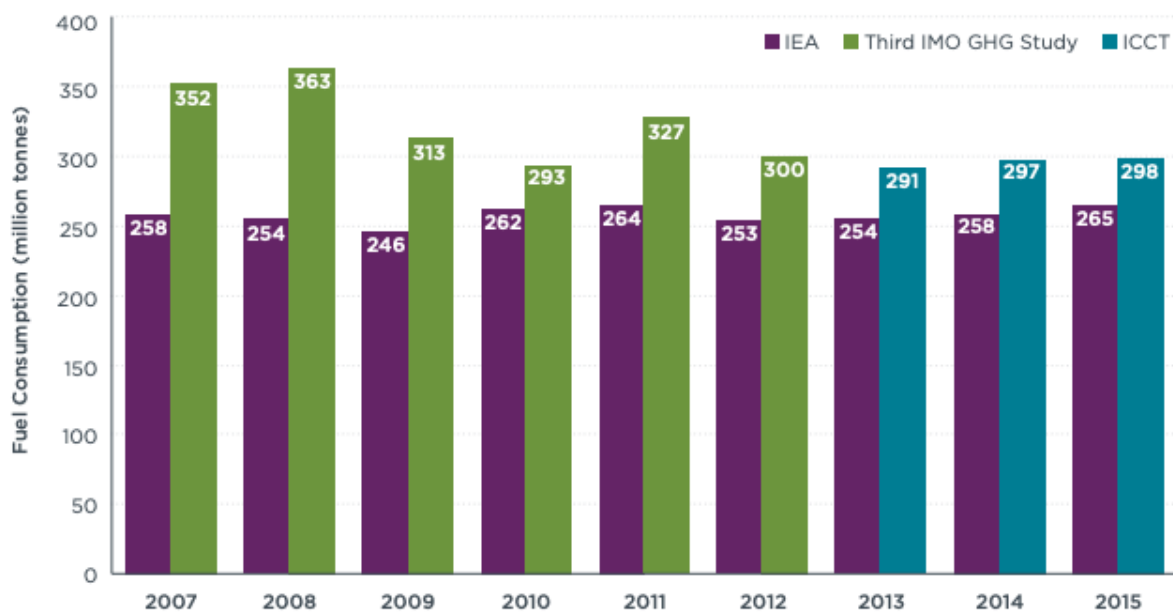
Pour ce qui touche les perspectives de génération de gaz à effet de serre, l'IMO a étudié différents scénarios afin de simuler le futur de la flotte mondiale. Tout comme les transports aériens ou terrestres, l'IMO a pour objectif de minimiser les impacts de l'industrie sur l'environnement. La figure 2.1 représente graphiquement les résultats obtenus des diverses simulations. Cependant, les différents scénarios les plus probables anticipent une croissance soutenue du transport maritime (les lignes en couleurs) alors que la fourchette globale varie d'une réduction modeste des gaz à effet de serre (GES) à une explosion du transport maritime.

Les diverses hypothèses afin d'élaborer les scénarios reposent sur une variation d'améliorations des navires et d'augmentations des échanges internationaux. Les deux extrêmes représentent le meilleur et le pire scénario. Dans le meilleur des cas, les améliorations techniques sont apportées aux navires, les opérations sont optimisées afin de réduire la consommation inutile de carburant, la performance des moteurs est revue à la hausse, l'utilisation de nouveaux combustibles tels que le gaz naturel liquéfié ou les biocarburants, etc. Cette vision suggère une réduction de 25 % à 75 % des GES par rapport aux émissions de 2009. Dans le cas opposé, le transport maritime continue de croître sans amélioration ni obligation environnementale. La finalité de ce scénario se conclut par une hausse des GES entre 200 % et 300 % en 2050. (IMO, s.d.) La réalité du futur se situant évidemment entre ces deux visions.



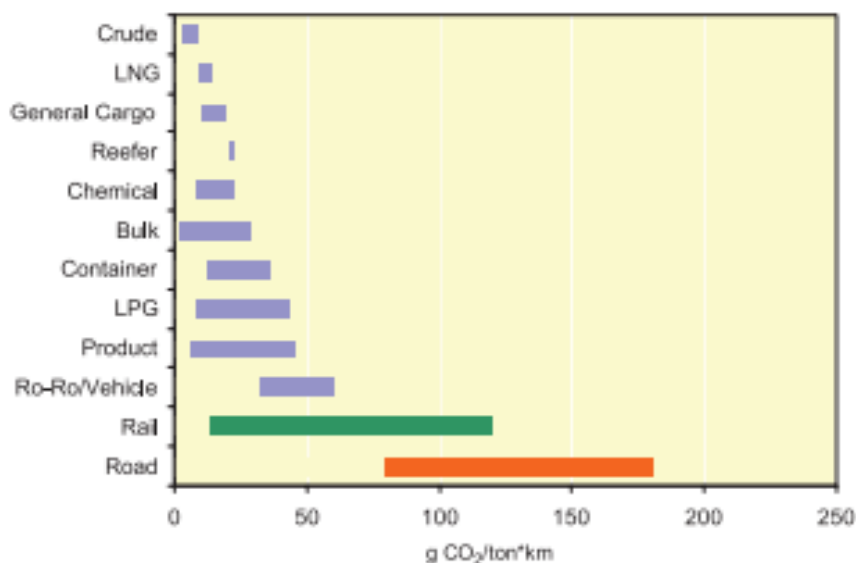
**Figure 2.1 : Les scénarios analysés de l'IMO planifient une fourchette de croissance possible des émissions de CO<sub>2</sub> (tiré de : IMO, 2009).**

Or, quoique les augmentations de volume de matières transportées et de navires soient notables au cours des dernières années, les données semblent indiquer que la consommation globale de carburant de la flotte mondiale est stable depuis les dernières années. En effet, la figure 2.2 fait la compilation de trois sources différentes (l'Agence Internationale de l'énergie [IEA], l'Organisation Maritime Internationale [IMO] et l'*International Council on Clean Transportation* [ICCT]) concernant la consommation globale de carburant par les navires de transport. Or, il appert que les chiffres sont du même ordre de grandeur, c'est-à-dire que les données se maintiennent entre les sources et entre les années de référence. Les données sont des valeurs approximatives, car plusieurs difficultés subsistent à avoir des valeurs absolues, notamment la fragmentation du marché entre les armateurs, la confidentialité de l'information (car la consommation des bateaux est une information concurrentielle), etc.



**Figure 2.2 : La consommation de carburant de la flotte mondiale selon trois sources** (tiré de : Olmer, Comer, Roy, Mao et Rutherford, 2017).

D'autre part, quoique les scénarios représentent une augmentation notable des GES pour les prochaines années à venir, l'industrie maritime est un des moyens de transport les plus efficaces en comparaison des GES émis en fonction de tonne déplacée par kilomètre. Une telle comparaison est présentée à la figure 2.3 ci-dessous.



**Figure 2.3 : Comparaison des différents modes de transport en fonction des émissions de GES par unité de tonne par kilomètre** (tiré de : IMO, 2009).

Selon la figure 2.3, les méthodes de transport associées au transport maritime sont le *bulk* ou vrac et le *container* ou cargo de conteneurs. Pour ce qui est des comparables, le bateau peut être comparé avec le train (*rail*) et le transport routier (*road*). Ainsi, le transport maritime se compare avantageusement par rapport aux autres modes de transport traditionnel. Le transport maritime est, du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, à privilégier lors de choix entre divers modes de transport.

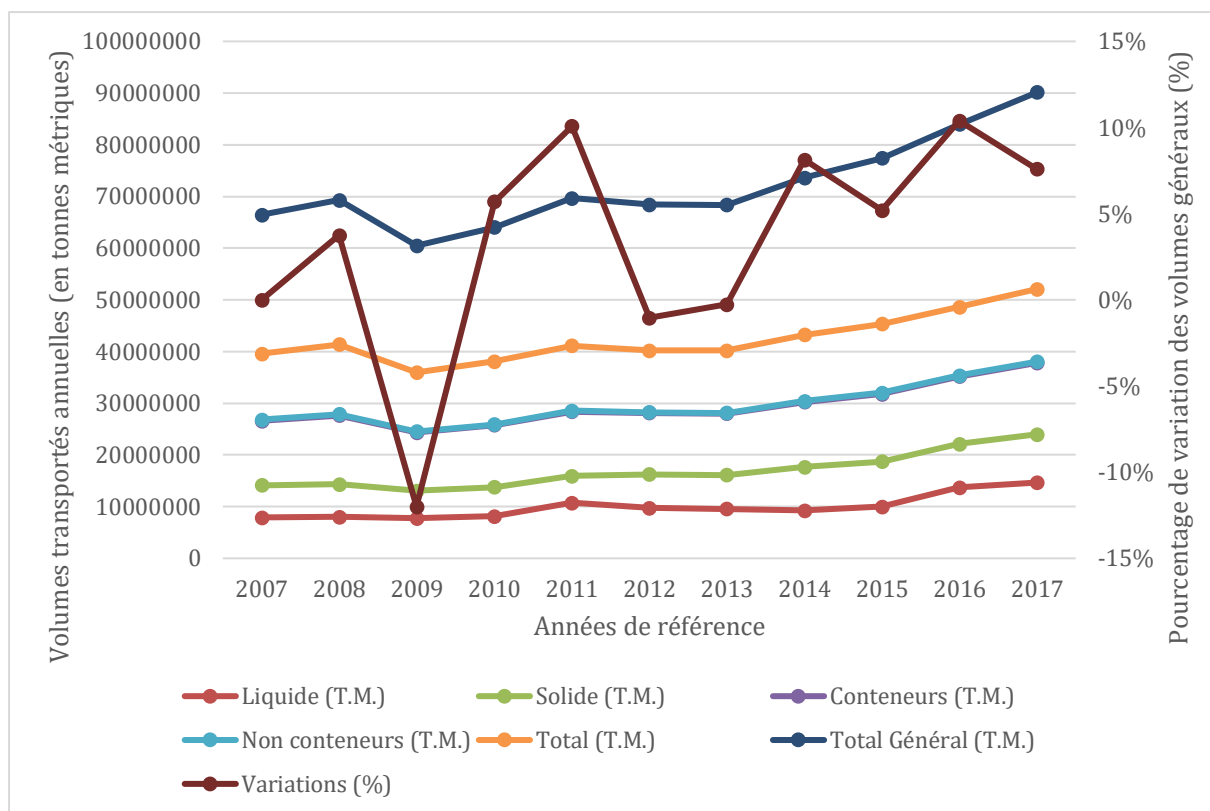
### 2.3. L'évolution transport sur le fleuve Saint-Laurent

D'un point de vue plus local, le port de Montréal a vu ses activités augmenter au cours des dernières années. Alors que les volumes commerciaux comptabilisés pour ce qui touche le vrac et le nombre de conteneurs sont en nette progression (Port de Montréal, 2018), le volume de passagers de bateaux de croisières est également en hausse constante. Les estimations anticipent une hausse de plus de 14 % pour un nombre total de 130 000 passagers en 2018 (La Presse Canadienne, 2018). Pour ce qui touche les volumes de marchandises, la figure 2.4 représente l'augmentation des volumes des dix dernières années où seules trois années ont été à croissance négative. Alors que 2009 était l'année de la crise économique mondiale qui a entraîné une baisse majeure des volumes (plus de 10 %) (La Presse Canadienne, 2011), les deux autres années de contraction sont de valeurs faibles ce qui représente plus une stagnation qu'une diminution marquée des volumes échangés.

Tonnes métriques 2007-2017							
Année	Vrac		Marchandises diverses			Total général	Var.
	Liquide	Solide	Conteneurisées	Non cont.	Total		
2007	7 861 385	6 295 142	12 406 026	295 752	12 701 778	26 858 305	
2008	8 005 416	6 324 357	13 321 147	215 630	13 536 777	27 866 550	3,75%
2009	7 773 149	5 316 432	11 265 868	168 690	11 434 558	24 524 139	-11,99%
2010	8 151 136	5 584 939	12 033 434	150 158	12 183 592	25 919 667	5,69%
2011	10 760 649	5 172 846	12 471 002	129 767	12 600 769	28 534 264	10,09%
2012	9 721 422	6 537 448	11 845 467	130 167	11 975 634	28 234 504	-1,05%
2013	9 549 933	6 550 690	11 896 671	159 677	12 056 348	28 156 971	-0,27%
2014	9 246 741	8 433 434	12 575 069	190 740	12 765 809	30 445 984	8,13%
2015	9 970 666	8 740 279	13 092 607	225 189	13 317 796	32 028 741	5,20%
2016	13 696 988	8 419 191	13 062 887	178 509	13 241 396	35 357 575	10,39%
2017	14 660 949	9 331 783	13 819 388	229 410	14 048 798	38 041 530	7,59%

**Figure 2.4 : Les volumes transportés annuellement transitant par le port de Montréal sont en hausse constante** (tiré de : Port de Montréal, 2018).

Par ailleurs, une représentation graphique permet de mieux prendre conscience de la lente, mais régulière progression mondiale des volumes transportés annuellement par le secteur maritime. La figure 2.5 illustre cette progression.



**Figure 2.5 : L'évolution des volumes annuels transportés par voie maritime** (inspiré de : Port de Montréal, 2018).

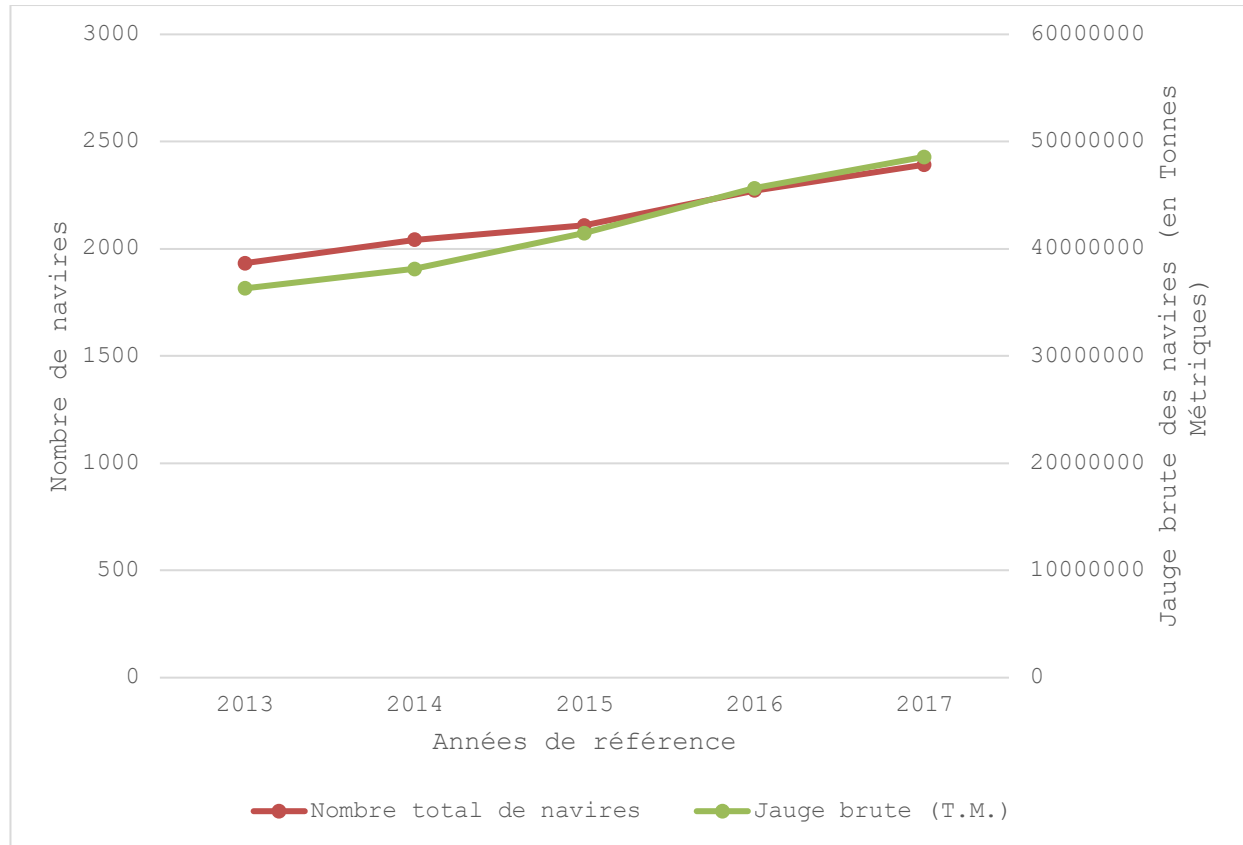
De plus, en ajoutant les informations de la figure 2.6, il est possible de constater que, en plus d'avoir des volumes en hausse, le nombre de navires est également en hausse notable au cours des 5 dernières années.

	2017	2016	2015	2014	2013
<b>Nombre total de navires</b>	2 392	2 271	2 109	2 042	1 933
<b>Jauge brute</b>	48 573 166	45 639 883	41 468 723	38 126 950	36 307 692

**Figure 2.6 : Le nombre et le tonnage des navires accostant au port de Montréal** (tiré de : Port de Montréal, 2018).

En faisant le même exercice qu'à la figure 2.5, il est possible de constater que localement à Montréal, les volumes transportés et le nombre de navires sont en hausse. Or, une analyse de la figure 2.7 permet de

mieux visualiser le constat que la croissance des volumes transportés augmente plus rapidement que le nombre de navires. Incidemment, la croissance du commerce transitant à Montréal est double, soit une hausse du nombre de navires et une augmentation des capacités de transport de ces bateaux.



**Figure 2.7 : L'historique des navires au port de Montréal** (inspiré de : Port de Montréal, 2018).

Concomitamment, alors que l'IMO anticipe des hausses mondiales de volumes et de navires pour les prochaines années, les statistiques locales permettent de corréler les hypothèses dans la mesure où localement, il est aussi possible de voir cette hausse de l'achalandage maritime.

Ainsi, les analyses des spécialistes pointent vers une hausse du marché des substances antisalissures au cours des prochaines années. Cette hausse sera vraisemblablement plus marquée en Asie où la construction de navires est en effervescence actuellement. Or, bien que les volumes transportés et le nombre de navires sont en hausse, la consommation de carburant est relativement stable quoique les prédictions anticipent une hausse marquée d'ici 2050. Une des raisons de la limitation de carburant est l'utilisation de technologie favorisant l'optimisation des opérations où les produits antisalissures sont une

avenue de réponse. De plus, le comportement de marché en augmentation est transposable à une échelle locale où les activités maritimes du Port de Montréal sont également en hausse de volume et de nombre de navires au cours des dernières années.



### **3. LES NORMES ET RÉGLEMENTATIONS**

Comme vu dans la précédente section, les volumes utilisés de produits antisalissures sont en hausse et les impacts environnementaux de ces produits ne sont pas sans dommage pour l'environnement. Or, le monde marin a cette particularité que malgré que les bateaux soient enregistrés dans leur pays d'origine, la fonction première de ces navires est de se déplacer d'un pays à un autre pays. Incidemment, les normes auxquelles sont soumis ces paquebots sont doubles, c'est-à-dire que ce sont à la fois les normes du pays où ils sont enregistrés et les normes du pays où les navires se trouvent qui s'appliquent. Afin de standardiser les exigences de toutes sortes (santé et sécurité, environnement, droit, etc.), les états se sont regroupés sous l'égide d'une organisation internationale afin de faire respecter les conventions maritimes. À ce jour, l'IMO gère plus d'une cinquantaine de conventions et accords internationaux pour tous les états participants. (IMO, 2018b)

Par ailleurs, tel que mentionné par l'IMO elle-même : « L'Organisation elle-même n'a aucune compétence pour faire appliquer les conventions. » (IMO, 2018b) et doit donc s'en remettre à ses membres afin de faire appliquer les traités et les conventions maritimes.

#### **3.1. Les normes internationales**

Les diverses législations qui règlementent le trafic maritime peuvent provenir de plusieurs institutions. Certaines instances ont des pouvoirs législatifs symboliques alors que certaines autres ont un pouvoir juridique et un pouvoir d'actions.

Par exemple, dans les instances symboliques, les traités entre deux pays peuvent inclure des intentions de protection d'environnement, mais sans limites ni directives claires facilement applicables. Parmi ces grands traités, l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) aujourd'hui en renégociation (Bouvier-Auclair, 2018) présente des restrictions au niveau de la protection de l'environnement, mais ne contient pas de mécanisme de reddition de comptes des partis participants.

Également, parmi les instances symboliques, l'organisme international chargé d'émettre des recommandations pour la protection des eaux est l'Organisation maritime internationale (IMO) qui est une agence spécialisée de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Encore une fois, cette agence a un pouvoir symbolique d'émettre des recommandations, mais ne possède pas de pouvoir de coercition envers les contrevenants. Le fonctionnement de l'agence fonctionne sur le principe que les pays membres (plus de 174 pays membres et dont le Canada fait partie depuis 1948 [IMO, 2018]) incorporent à leurs

législations nationales les normes et règlements entérinés par les pays membres. (IMO, 2018b) Ces normes font figure d'intentions, mais ne sont pas contraignantes pour les armateurs de navires.

### **3.2. La réglementation canadienne : fédérale et provinciale**

Ainsi, les entités souveraines que sont les pays sont assujetties à des normes et règlements internationaux auxquels elles souscrivent et se doivent de les faire respecter. En ce qui touche la législation des gouvernements, dans le cas plus précis de la province du Québec, les deux paliers de gouvernement, soit le palier fédéral et le palier provincial, peuvent imposer des lois. En faisant un survol rapide des séparations de pouvoir, il est possible de constater que les lois applicables pour les substances antisalissures sont majoritairement au niveau fédéral alors que les lois provinciales visent principalement la gestion des eaux.

En premier lieu, la séparation des pouvoirs repose sur les Lois constitutionnelles de 1867 à 1982 qui attribuent la responsabilité complète au gouvernement fédéral pour ce qui touche « La navigation et les bâtiments ou navires (*shipping*) » selon l'article 91(10). Par ailleurs, en ce qui traite des responsabilités provinciales à l'égard des produits antisalissures, l'article 92(16) serait le plus pertinent, lequel stipule : « Généralement toutes les matières d'une nature purement locale ou privée dans la province ». C'est cette désignation qui est la plus pertinente puisque la qualité de l'environnement y est intrinsèque et qu'elle vise la protection des ressources provinciales. (Constitution Canadienne, s.d.)

En second lieu, la réglementation du Québec visant les eaux repose principalement sur la Loi sur la qualité de l'environnement qui réglemente les notions de polluants et de pollution dans les milieux atmosphériques, aquatiques et les sols. Or, telle que définie par la Constitution canadienne, cette loi ne s'applique pas sur les embarcations, car le gouvernement provincial n'a pas d'autorité législative. D'autre part, il y a quelques articles du Code civil du Québec, mais ces articles n'affectent pas les usages de la navigation. Incidemment, les textes du gouvernement provincial ne ciblent pas et ne réglementent pas les usages des produits antisalissures.

Cependant, la situation est tout autre au niveau du gouvernement fédéral où les droits législatifs sont clairement définis. La législation applicable aux produits antisalissures au niveau fédéral canadien est supportée par Santé Canada qui classe les substances antisalissures dans les catégories des agents de préservations de matériaux, de revêtements antisalissures et des pesticides. À la consultation de la liste des produits homologués par le gouvernement, seuls les produits à base de cuivre ou de composés cuivrés sont officiellement approuvés pour utilisation. Le contrôle de ces produits chimiques pour

l'utilisation repose sur les fondements juridiques de la Loi sur les produits antiparasitaires (Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire de Santé Canada, 2016),

Pour ce qui touche des bateaux de plaisance ou récréatifs, le gouvernement fédéral a une législation s'appliquant à ces embarcations, soit le Règlement sur les petits bâtiments DORS/2010-91 découlant de la LOI DE 2001 SUR LA MARINE MARCHANDE DU CANADA L.C. 2001, ch. 26. Cependant, alors que le dernier amendement date du 16 mai 2018, les restrictions ne s'appliquent que sur les navires d'une jauge brute de 400 tonneaux ou plus (certificat de système antisalissure obligatoire) et les navires ayant une jauge brute de moins de 400 tonneaux mais ayant une longueur de 24 mètres ou plus (obligation d'avoir une autodéclaration à bord). Incidemment, les navires de moins de 24 mètres de longueur et ayant une jauge brute de moins de 400 tonneaux sont assujettis à la seule obligation de ne pas utiliser le tributylétain comme agent antisalissure.

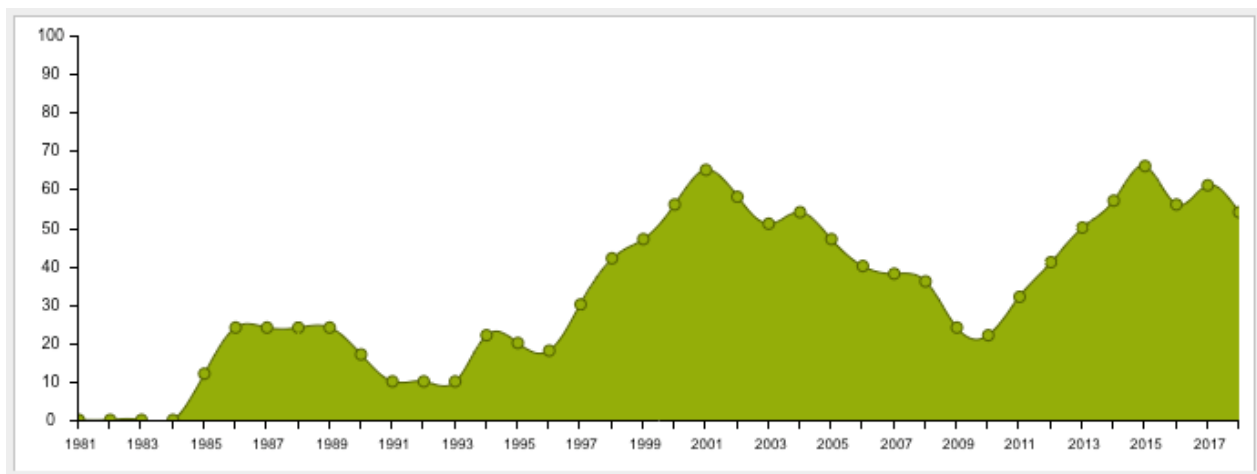
### **3.3. Les autres réglementations dans le monde**

Chaque pays étant souverain, chaque pays possède ainsi sa propre législation concernant les produits antisalissures. Alors que traditionnellement, certaines régions font office de meneur en ce qui a trait aux législations concernant les substances antisalissures utilisées, les régions en forte croissance commencent également à mettre en place des restrictions. Or, une problématique apparaît lorsque les législations ne sont pas cohérentes, c'est-à-dire lors que les interdictions varient d'un espace national à un autre, entraînant ainsi des contradictions. D'autre part, certaines régions qui étaient passives, voire se référaient aux législations reconnues et acceptées mondialement, commencent à former leurs propres restrictions sur l'usage des produits chimiques. Cette situation entraîne une complexification, car les classifications elles-mêmes varient d'un pays à l'autre. (Pianoforte, 2015) Un tel exemple est la création récente du centre de la Corée du Sud (*Korea REACH - The Act on the Registration and Evaluation of Chemicals*) (CIRS, 2013). Or, auparavant, la Corée du Sud fondait ses orientations sur les indications de l'Union européenne. Ainsi, il y aura dédoublement de la réglementation, car les systèmes de classification et de gestion des composés chimiques ne seront plus les mêmes.

Parmi les législations les plus sévères concernant les revêtements antisalissures, trois régions dans le monde font des restrictions afin d'encadrer les produits visant à protéger les coques des navires. Alors que ces régions imposent des normes ou des règlements stricts, les actions et les recommandations fluctuent d'une région à l'autre, mais l'objectif est identique, c'est-à-dire de vouloir mieux protéger l'environnement. Les trois territoires présentés ci-dessous ne sont pas obligatoirement les plus limitatifs, mais ils permettent de mieux comprendre les mécanismes de contrôle et d'anticiper les futures tendances de resserrements législatifs à moyen ou à long terme.

### 3.3.1. L'Australie

Le premier cas est l'Australie, car c'est dans ses eaux nationales que se trouve la Grande Barrière de corail (UNESCO, s.d.-b). Or, la biodiversité présente à cet endroit est tout aussi unique que fragile, car c'est à cet endroit que l'on retrouve l'habitat d'espèces en voie d'extinction et où les états surveillent l'état de santé des lieux. Au cours des dernières années, le Comité du patrimoine mondial a mesuré la tendance des risques affectant la Grande Barrière de corail. L'évolution des menaces est représentée à la figure 3.1.



**Figure 3.1 : Les niveaux de menaces affectant la Grande Barrière de corail en Australie** (tiré de : UNESCO, s.d.).

Les niveaux de menace sont la compilation de tous les événements rapportés de manière sollicitée ou non sollicitée concernant des problèmes affectant les sites de conservation des milieux désignés comme patrimoine mondial. Dans le cas de la figure 3.1, ce sont tous les événements rapportés qui menaçaient l'intégrité de la grande barrière de corail (Patry, Bassett et Leclercq, 2005).

Alors que la reconnaissance mondiale de ce lieu unique est intrinsèquement synonyme de patrimoine à protéger pour les générations futures, l'attrait pour les touristes et les voyageurs se fait de plus en plus ressentir afin de visiter ce site unique. Or, les déplacements sont obligatoirement faits en bateaux qui sont sujets à l'utilisation des produits antisalissures.

Incidentement, c'est pour la protection de cet endroit unique que l'Australie impose des contrôles sévères aux propriétaires d'embarcations. C'est dans cet esprit que le gouvernement australien, sous la direction du département de l'agriculture et de l'énergie, a émis en avril 2015 des lignes directrices concernant les substances antisalissures et le nettoyage des coques immergées.

De manière générale, les consignes exigées pour l'utilisation des antisalissures :

1. Une connaissance des produits qui seront appliqués sur les coques. La connaissance de la composition chimique, la validation que le produit utilisé est approuvé par les autorités compétentes (les gouvernements de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande) et les instructions d'utilisation d'application du produit.
2. Une sélection appropriée des produits utilisés en fonction des utilisations anticipées.
3. De faire une maintenance appropriée de la coque selon les exigences du fabricant.
4. De conserver l'historique des applications et de la maintenance.
5. D'avoir un plan d'urgence, en cas de déversements accidentels ou de contaminations des eaux.

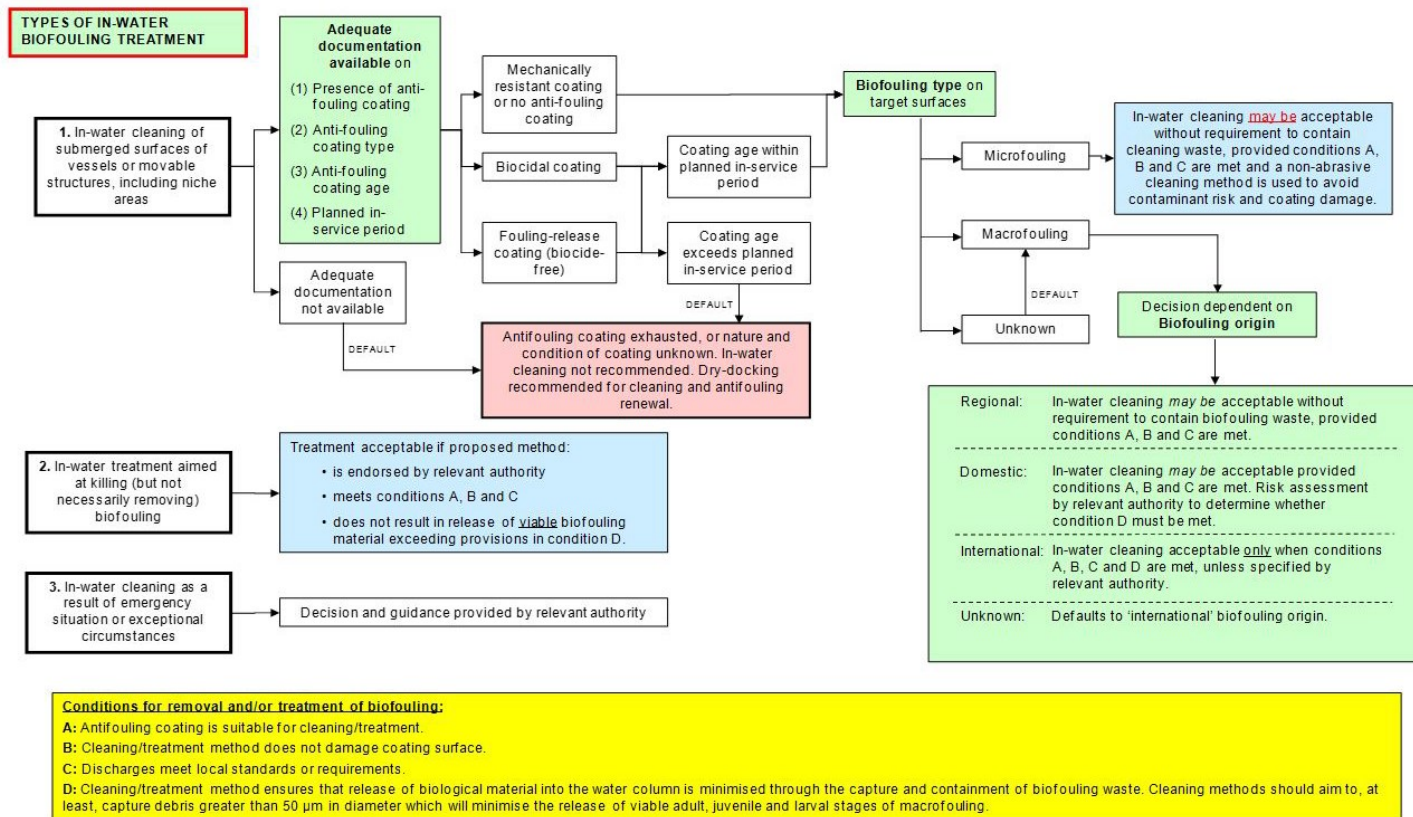
Également, pour la maintenance de la coque, les exigences sont :

1. Déterminer les contaminants et les biorisques d'un nettoyage de coque dans l'eau (*'in-water'*).
  - a. Savoir si le recouvrement de la coque permet un nettoyage sécuritaire (sans relâchement de substances nocives dans l'environnement).
  - b. Procéder à la documentation de la maintenance.
  - c. Déterminer l'origine des salissures sur la coque (régionale, domestique ou internationale).
  - d. Caractériser les salissures :
    - i. Le type (macromolécules, microcouche et/ou macrocouche)
    - ii. La diversité
    - iii. L'âge
    - iv. L'abondance

Les exigences ci-dessus ont été tirées du guide *'Anti-fouling and In-water Cleaning Guidelines'* (Australian Government, 2015) et s'appliquent à tous les types de navires (commerciaux et récréatifs) de même que pour les installations fixes (quais, pontons, etc.).

Par ailleurs, le guide gouvernemental australien contient une matrice décisionnelle afin de déterminer si le nettoyage est permis et dans quelles conditions réaliser ce nettoyage.

Ce logigramme décisionnel est représenté à la figure 3.2.



20

**Figure 3.2 : La matrice décisionnelle du guide de protection des eaux du gouvernement de l'Australie (tiré de : Australian Government, 2015).**

### 3.3.2. La Californie

Une seconde région est la Californie qui est l'état le plus peuplé des États-Unis (U. S. Census Bureau, 2018). Or, la Californie possède une riche biodiversité dont l'importance est telle qu'un conseil de la biodiversité de la Californie a été créé en 1991 afin d'améliorer la coordination et la coopération entre les diverses parties prenantes législatives (les gouvernements fédéral, des états et locaux). (California Biodiversity Council, 2018)

Concomitamment, l'État fait la gestion entre les besoins de la population et la protection de l'environnement. C'est dans cette optique que périodiquement, les règles encadrant les produits antisalissures sont revues afin de valider si ces deux mandats sont accomplis dans le respect des générations futures.

Ainsi, lors de la dernière évaluation environnementale sur les pesticides en janvier 2017, les données recueillies par les scientifiques présentées au comité d'évaluation et d'enregistrement des pesticides ont démontré que les échantillons des eaux prélevées contenaient un excédent de composés cuivrés, ce qui mettait en danger la vie aquatique à proximité des activités humaines. Les actions entreprises afin de corriger cette situation ont été de réévaluer les licences des produits autorisés commercialement. Cette réévaluation s'est basée sur un durcissement des normes d'émission des composés cuivrés à un seuil maximal de  $9,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  où la mesure a été adoptée en janvier 2018 et dont l'entrée en vigueur a été fixée pour le 1<sup>er</sup> juillet 2018. (American Coatings Association, 2018)

Précédemment, lors de l'évaluation précédente de 2013, les limites d'émissions de composés cuivrés étaient de  $9,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  pour les coques qui n'étaient pas nettoyées plus d'une fois par mois et qui avaient recours à des tapis à poils doux lors des nettoyages en eau et une limite d'émission de  $13,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  pour les recouvrements qui n'étaient pas nettoyés en eaux (cale sèche seulement). (Department of Pesticide Regulation, 2018)

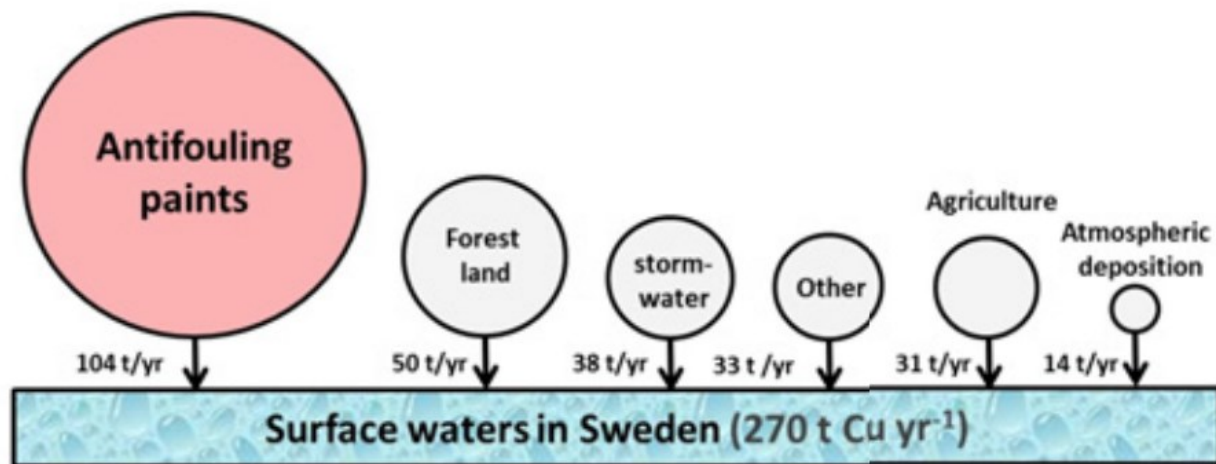
Par ailleurs, alors que les études d'impact ont porté sur les navires de plaisance et les navires commerciaux, les restrictions énumérées ci-dessus n'ont été retenues que pour les navires de plaisance.

Selon la liste publiée par le gouvernement en date de la dernière mise à jour du 20 juillet 2017, 91 produits se conformaient à un taux d'émission de moins de  $9,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{jour}$  alors que 118 produits étaient supérieurs à cette limite (Department of Pesticide Regulation, 2017).

### 3.3.3. L'Union européenne et la Suède

Un dernier exemple est une situation de partenariat en Union européenne afin de protéger la mer Baltique. Un rapport publié en 2015 par Jonas Nilsson et Lena Gipperth fait le portrait de la situation de cette région sensible et propose des avenues afin de mieux contrôler les polluants marins occasionnés par les produits antisalissures. Ce rapport a été produit à la demande de la Suède d'où un accent presque exclusif sur les pratiques de ce pays.

Les analyses utilisées dans le rapport afin de prendre action découlent d'une étude menée en 2011 (Ejhed et al., 2011) qui a permis de déterminer que les intrants de cuivre dans les cours d'eau de surface de la Suède sont répartis tels que la figure 3.3.



**Figure 3.3 : Les intrants de cuivre dans les eaux de surface de Suède selon une étude de 2011** (tiré de : Bighiu, 2017).

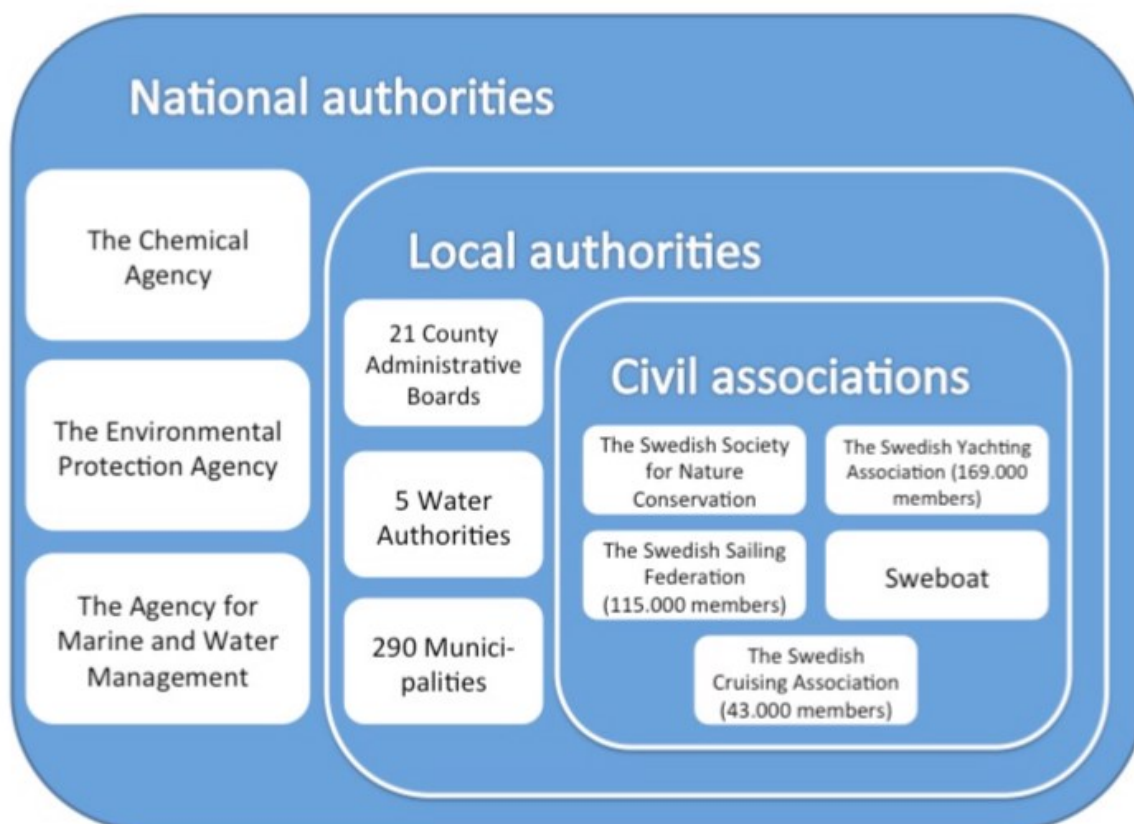
Or, la principale source d'intrant du cuivre dans les eaux de surface de Suède se trouve être les peintures antisalissures, soit d'origine anthropique. Pour mieux contrôler ces apports substantiels et afin de protéger les cours d'eau et la biodiversité maritime, le gouvernement suédois a opté pour une réglementation par zone (voir la figure 3.4) afin de mieux réglementer les produits utilisés. Par ailleurs, la réglementation suédoise découle d'une caractérisation des concentrations maximales acceptables dans l'eau.





**Figure 3.4 : Les concentrations maximales de cuivre approuvées dans les produits antisalissures par les autorités suédoises (tiré de : Bighiu, 2017).**

Le rapport (Nilsson et Gipperth, 2015) trace le portrait législatif des différentes parties prenantes impliquées dans la réglementation des substances antisalissures utilisées en suède. Un schéma représentant les juridictions est représenté à la figure 3.5.



**Figure 3.5 : Les différentes parties prenantes impliquées dans la gestion des eaux baltiques en Suède** (tiré de : Nilsson et Gipperth, 2015).

Le fonctionnement de cet organigramme (figure 3.5) est tributaire d'un partage des rôles et responsabilités, soit la mise en place de lois et consignes par les autorités nationales et par une supervision des activités par les autorités locales. Les associations civiles sont mises à contribution pour la sensibilisation des usagers. La figure 3.6 représente le découpage des territoires selon les bassins versants locaux.



**Figure 3.6 : Les bassins de Suède ont servi de limites pour définir les autorités locales (les *water Authorities* de la figure 3.5) (tiré de : Nilsson et Gipperth, 2015).**

Parmi les principales mesures soulignées dans le rapport, le classement des produits antisalissures en trois catégories selon les concentrations des composés cuivrés et où les catégories 1 et 2 sont utilisables uniquement par les professionnels qualifiés alors que la catégorie 3 est utilisable par tous. Aussi, les catégories utilisables sont restreintes selon les eaux naviguées et selon le type d'embarcation. En effet, les navires pesant moins de 200 kilogrammes ne sont pas autorisés à avoir recours aux substances antisalissures en Suède.

Incidemment, les organismes internationaux tels que l'IMO, fondent leurs approches sur les consensus des pays partenaires. Or, ces engagements internationaux doivent être entérinés par les pays signataires pour avoir force de loi. Certains pays se limitent aux accords internationaux dans leurs réglementations et exigences environnementales alors que certaines régions du globe possèdent des éléments naturels particuliers d'importance exceptionnelle ou unique reconnus par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Or, ces pays se doivent de prendre des initiatives afin de protéger leur patrimoine ou les portions de leurs territoires les plus à risques. Puisque les recouvrements sont une combinaison de matrice s'érodant en fonction de la friction avec l'eau et d'une concentration de métal agissant comme agent biocide, il est possible de réglementer ces deux paramètres afin de mieux

contrôler la dispersion des substances chimiques dans l'environnement. Ainsi, la Californie a choisi de limiter les taux d'émissions de ce métal (le cuivre) alors que la Suède a opté pour une restriction sur la concentration maximale contenue dans les composés antisalissures. Cette dernière approche est plus restrictive, car elle ne considère que la valeur absolue de cuivre anthropique et ignore la fonction de régulation de dispersement de la matrice à être érodée. Mais en prenant cet angle, les résidus de peintures ou d'émission des recouvrements sont mieux contrôlés, car ils sont intrinsèquement moins concentrés. C'est d'ailleurs pour éviter le relâchement incontrôlé de ces débris chimiques que l'Australie a mis en place un guide afin d'expliquer les procédures à suivre pour nettoyer dans l'eau les coques des navires.

Ultimement, les prochaines législations à venir viseront une meilleure protection de l'environnement, ce qui occasionnera des coûts additionnels de développement et d'homologation des produits. Alors que les produits antisalissures deviennent de plus en plus spécifiques à l'industrie du transport, les possibilités d'usage commun avec d'autres domaines, notamment les pesticides et le domaine pharmaceutique, sont de plus en plus restreintes. (Pianoforte, 2015)

#### **4. LES ENTREVUES AVEC DES EXPERTS DU DOMAINE DES ANTISALISSURES**

Tout au long de la rédaction de l'essai, la recherche référentielle a permis de voir les impacts et les résultats des différentes approches alors que les études de marché ont été fournies par les entreprises privées. Or, dans l'optique de réaliser un tour complet du sujet, l'opportunité de découvrir le point de vue d'acteurs de la recherche s'avère un incontournable. Incidemment, deux entrevues ont été menées avec deux parties prenantes. La première avec un chercheur du centre de recherche MERINOV. La seconde avec un inventeur et gestionnaire de sa compagnie.

##### **4.1. L'entrevue avec Nicolas Toupoint, Ph. D.**

Dans le cadre de cet essai, il a été possible de faire un entretien sur les substances antisalissures avec Nicolas Toupoint, Ph. D., chercheur industriel à l'institut MERINOV. Le centre MERINOV est un centre de recherches et de développement pour les domaines de la pêche, l'aquaculture, de la transformation et de la valorisation des produits aquatiques au Canada. Les activités de recherche se situent à la jonction entre le réseau de recherche universitaire et les entreprises où la quête d'amélioration des pratiques et processus actuellement utilisés sont la motivation première. Cet organisme à but non lucratif compte plus de 100 chercheurs répartis entre quatre centres de recherche localisés en Gaspésie, aux Îles-de-la-Madeleine et sur la Côte-Nord. (« Merinov », s.d.)

Dans le cadre de ses recherches, Nicolas Toupoint aspire à améliorer les pratiques d'élevage en milieux naturels qui se localisent dans l'est du Canada. Les études se déroulent en partenariat avec les entreprises qui subventionnent et ambitionnent à améliorer leurs pratiques afin d'optimiser leurs opérations. Ces associations entre milieux académiques et industriels favorisent la quête de meilleures pratiques basées sur les réalités du terrain. L'aspect qui fait l'objet de sa recherche est le nettoyage des installations fixes tout en conservant les élevages exempts de composés chimiques, ce qui rendrait les animaux impropres à la consommation humaine. C'est ainsi que les composés cuivrés ou à base de cuivre des produits utilisés par la marine marchande ne sont pas des solutions envisageables pour ces utilisations.

Les rapprochements entre les recherches de monsieur Toupoint et l'essai actuel sont nombreux. En premier lieu, la création de biofilm sur les parois des installations fixes est tout aussi problématique que sur les coques des navires. En second lieu, la recherche d'une solution sans impacts pour l'environnement n'existe malheureusement pas à ce jour. Finalement, les essais se font à petits pas, c'est-à-dire en utilisant une approche itérative et par des essais.

Les recherches dirigées par Nicolas Toupoint visent essentiellement à améliorer les processus de nettoyages des installations fixes. À ce jour, le nettoyage des parois sans protections contre le biofilm s'effectue manuellement, c'est-à-dire avec un jet d'eau sous pression ou chimiquement (par exemple : par saumurage) à des fréquences données par un employé. Or, cette approche demande temps et argent de la part des compagnies tout en offrant une solution que très temporaire.

Quelques techniques ont été testées afin d'explorer de nouvelles avenues. Trois essais de solutions ont eu lieu simultanément. La première approche a été l'utilisation d'un composé à base de silicone d'une jeune entreprise en démarrage du Québec. La seconde procédure avait recours à un bullage jumelé à un rayonnement ultraviolet (procédé photo-actif). La troisième technique a été celle du recours à des prédateurs biologiques pour une protection sans produits ajoutés. La quatrième méthode était une surface vierge de protection afin de servir de surface témoin. Cette dernière approche sert à faire la comparaison des pratiques actuellement utilisées. À ce jour, toutes les surfaces se font coloniser à plus ou moins grande vitesse, mais il est possible de percevoir les premiers signes de salissure après trois mois seulement sur toutes les surfaces expérimentales.

Dans le rapport de cette expérimentation, plusieurs facteurs ont été colligés, mais deux constatations sont significatives par rapport aux produits antisalissures. La première conclusion démontre que toutes les surfaces traitées comportaient des présences plus ou moins fortes de salissures après une courte période. La seconde observation était que la croissance des individus était différente entre les enclos des divers produits testés. Or, les taux de croissance des individus observés allaient de taux positifs à taux négatifs (décroissance des spécimens) tout en présentant des variations entre le type de milieu (naturel ou fermé). Incidemment, des analyses plus poussées sont requises afin de mieux comprendre les dynamiques impliquées. (Toupoint, Nadeau et Chevarie, 2017)

Finalement, les prochains jalons de l'équipe de Nicolas Toupoint seront de mieux comprendre les processus engendrant l'apparition des salissures : comment les biofilms adhèrent aux composés plastiques, quelles sont les étapes de colonisation d'une surface, etc.

Parmi les pistes de solutions prometteuses, il y a la tendance de délaisser les solutions des composés chimiques synthétiques afin de faire des observations sur les interactions dans la nature. Par exemple, les animaux de mer (anémones, éponges, étoiles de mer, etc.) qui sont statiques ou ne bougent que très faiblement sont soumis aux mêmes pressions de salissures, mais leurs surfaces parviennent à repousser les organismes indésirables. Ce sont ces mécanismes de protection qui doivent être mieux analysés et reproduits à grande échelle. (Toupoint, 2018, 17 décembre)

#### 4.2. L'entrevue avec Michel Deblois

La seconde entrevue s'est déroulée en compagnie de Michel Deblois, chercheur et gestionnaire de la compagnie MD Technologies Inc. localisée sur l'île d'Orléans. L'intérêt de la collaboration de Michel Deblois est de mieux comprendre les processus de développement ainsi que la phase de mise en marché de nouveaux produits.

Michel Deblois est un inventeur prolifique qui détient de nombreux brevets à son actif. Il est dans le secteur de la recherche et développement depuis plus de 30 ans et ses champs d'expertise varient du monde du caoutchouc à la balistique.

L'approche de monsieur Deblois afin de créer de nouveaux produits est de développer sa propre solution avant de regarder ce qui se fait. Cette méthodologie permet de penser différemment et de conserver son indépendance intellectuelle par rapport aux solutions existantes. De plus, deux critères sont essentiels lors de son cheminement créatif de solutions : la non-toxicité de la solution (l'approche ne doit pas tuer les spécimens) et la faible empreinte environnementale (notamment par l'évitement du recours aux solvants).

Or, deux produits développés par l'entrepreneur sont particulièrement intéressants dans le cadre de cet essai, soit un produit contre les moules zébrées et le produit *Shelduck*.

Le premier produit vise exclusivement les moules zébrées où un polymère repoussant cette espèce a été développé. Le développement de ce produit a nécessité de nombreuses heures d'observations et de recherches. Les aspects analysés étaient en outre : le comportement des moules, leurs déplacements, la façon dont elles se nourrissent, etc. L'agent actif utilisé est un répulsif naturel de la moule zébrée. De plus, une fois l'agent actif trouvé, un obstacle résidait dans le médium d'application où le composé doit conserver ses propriétés d'agent actif sans changer sa fonction. Ainsi, le produit final est un composé caoutchouté qui reste intact tout au long de son cycle de vie et est inoffensif pour les écosystèmes et les autres animaux. Les applications potentielles sont tout autant les navires en eaux douces que les installations fixes de filtration et canalisations des municipalités. Un facteur de succès pour la mise au point de ce produit réside dans la coopération entre des pôles d'expertises où monsieur Deblois a su s'entourer de représentants de disciplines complémentaires, notamment des microbiologistes. Cependant, pour des raisons de financement et de garantie, de distribution et d'acceptation par le marché, la commercialisation du produit ne s'est jamais concrétisée.

Le second produit est le *Shelduck* qui est un recouvrement de surface d'une très grande dureté et lisse. L'application se fait sous forme liquide (par rouleau, pinceau, projection ou autre) et c'est via un rayonnement à une fréquence d'onde précise que le durcissement se réalise. Ce produit peut être utilisé pour plusieurs usages, notamment les coques de bateaux, la protection des murs où un crayon à l'encre s'efface avec un chiffon et du jus de citron ou pour le recouvrement de canalisation. Le produit résiste aux milieux acides et basiques et aux milieux salés. Pour ce qui est des débouchés actuels, les principales utilisations sont dans les pays du sud avec des environnements marins très corrosifs. Pour ce qui est de la protection des coques des navires, le marché est difficile à percer principalement à cause des obligations financières. Alors que les compagnies de navires appliquent de multiples couches de différentes couleurs de peintures antisalissures afin de mieux surveiller l'effritement de la protection contre les biosalissures, les navires sont généralement en utilisation durant plusieurs années (autour de dix ans). Or, une maintenance normale en cale sèche dure plus de six mois où les revenus générés par le navire sont nuls. Incidemment, les essais d'un nouveau produit qui ne serait pas performant obligerait l'armateur à devancer sa mise en cale sèche ce qui occasionnerait des pertes et une non-productivité. C'est sous cet aspect que les compagnies demandent une garantie de performance des navires, mais où une petite entreprise ne possède pas les ressources financières pour couvrir ce risque. Par les forces de marché, une certaine inertie favorisant les produits déjà en place limite les innovations en émergence.

En conclusion, pour innover, il faut : savoir penser autrement, être patient pour développer ses propres solutions, avoir de la conviction et éviter le découragement, s'entourer de collaborateurs afin d'avoir une approche multidisciplinaire et ne pas sous-estimer les ressources nécessaires afin de pouvoir percer le marché. (Deblois, 2018, 20 décembre)



## **5. LA FEUILLE DE ROUTE DES PROCHAINS JALONS POUR LES REVÊTEMENTS ANTISALISSURES**

Les objectifs sont des feuilles de route permettent de mieux comprendre les intentions des différentes parties prenantes dans des horizons à moyen ou à long terme. Or, les mécaniques politiques étant parfois fastidieuses, les projets de loi ou les conventions internationales prennent de longs délais avant d'être appliqués. Cependant, les publications telles que les projets de loi, les prises de position de gouvernements ou les axes de recherches permettent de constater que les sujets sont toujours en discussion et que des intentions de mieux définir certaines pratiques encadrant les produits antisalissures sont envisagées.

Incidemment, les deux niveaux qui influencent la navigation dans les eaux canadiennes sont les ententes internationales sous l'égide de l'IMO et le gouvernement fédéral qui légifère ce champ d'activité.

### **5.1. Les objectifs mondiaux**

Les objectifs mondiaux sont majoritairement définis par les consensus décrétés par l'IMO. Or, depuis le bannissement des TBT, peu de progrès ont été réalisés par rapport aux normes entourant les produits antisalissures. Par exemple, la convention utilisée actuellement par les armateurs pour les revêtements antisalissures est la version de 2005 où aucune modification ni ajout à cette édition n'est répertoriée depuis. Il appert donc que les exigences n'ont pas évolué depuis cette première mouture alors que les réalités opérationnelles et commerciales ne sont plus les mêmes.

Également, en ce qui a trait aux ambitions des orientations stratégiques de l'organisme pour la période 2018-2023, les objectifs sont les suivants :

- « OS [Orientation Stratégique] 1 : Renforcer l'application
- OS 2 : Intégrer les technologies nouvelles et avancées dans le cadre réglementaire
- OS 3 : Répondre aux changements climatiques
- OS 4 : Participer à la gouvernance des océans
- OS 5 : Renforcer, à l'échelle mondiale, la facilitation
- OS 6 : Assurer l'efficacité de la réglementation
- OS 7 : Assurer l'efficacité de l'Organisation » (IMO, 2011b)

À la lecture des sept objectifs stratégiques énumérés ci-dessus, aucun n'a de lien avec l'utilisation des substances antisalissures ni même n'aborde le sujet. En définitive, le sujet n'est pas d'actualité dans un avenir à court terme.

Finalement, les derniers rapports de l'IMO traitant de la protection de l'environnement font davantage état de la gestion des EEE voyageant dans les eaux de ballast, des émissions à effets de serre et la pollution des eaux de manière générale (IMO, 2011a). D'ailleurs, ce rapport date de 2011 et aucune mise à jour n'a été publiée depuis ces sept dernières années.

## **5.2. Les objectifs du Canada**

Du point de vue du Canada, les répercussions environnementales de l'utilisation des produits antisalissures ne sont pas sur la liste des priorités nationales. En effet, les défis de la conservation de l'environnement sont nombreux puisque le pays est vaste et que les réalités locales varient grandement d'une région à une autre. En effet, la localisation stratégique du Canada à l'intersection de trois océans et l'abondance de voies navigables intérieures représentent autant d'écosystèmes susceptibles d'être affectés par les activités humaines.

Les exigences de Transport Canada concernant les eaux arctiques sont les plus strictes du territoire canadien où l'entité gouvernementale impose une veille environnementale en responsabilisant les propriétaires de bateaux :

« En outre, les armateurs et les exploitants sont responsables de s'assurer qu'ils naviguent de façon sécuritaire et écologique. Les rejets dans l'eau, les émissions atmosphériques, la libération de l'eau de ballast et les salissures des coques ont tous une incidence sur l'environnement. La conformité aux lois, aux règlements, aux normes et aux lignes directrices, ainsi que l'embauche de personnel formé et expérimenté, permettront de mener des activités sécuritaires. » (Transports Canada, 2010b)

Mais aucune contrainte distinctive visant spécifiquement l'arctique ni de contraintes légales obligeant l'atteinte de résultats concernant la protection de l'environnement ne sont décrites. Les produits antisalissures ne sont que brièvement évoqués afin de protéger les eaux, mais pas comme source de contaminants métalliques.

Concernant les grandes orientations du gouvernement fédéral pour les produits antisalissures, les initiatives sont majoritairement axées sur la gestion des océans de manière générale. En effet, le dernier rapport sur l'état des océans publié par le gouvernement date de 2012 où il est majoritairement question des problématiques globales telles que l'acidification des océans, les changements climatiques, les EEE, les récifs coralliens, etc. (Pêches et Océans Canada, 2012)

Par ailleurs, aucune intention de projet de loi n'a été recensée concernant les produits antisalissures de la part du gouvernement fédéral. Les publications laissent plutôt entrevoir une priorisation pour le contrôle

des EEE par rapport aux méthodes employées pour effectuer ce contrôle. Incidemment, les publications « Lignes Directrices Concernant l'Exploitation des Navires à Passagers Dans l'Arctique Canadien » (Transport Canada, 2018a), « Rapport du Canada sur l'état des océans 2012 » (Pêches et Océans Canada, 2012), « Le maintien de la biodiversité marine au Canada : relever les défis posés par les changements climatiques, les pêches et l'aquaculture » (Côté et al., 2012), le « Plan d'action canadien de lutte contre les espèces aquatiques envahissantes » (Pêches et Océans Canada, 2004) mentionnent le recours aux revêtements antisalissures pour préserver les écosystèmes et mentionnent superficiellement que ces produits peuvent contenir des substances toxiques. Au mieux, les références pointent à l'IMO concernant la « Convention internationale sur le contrôle des produits antisalissures dangereux » datant de 2001.

Pour conclure, alors que la crise environnementale du TBT exigeait une réponse rapide mondialement, des actions ont été prises et des gestes ont permis de supprimer la diffusion de TBT dans l'environnement via l'interdiction de l'utilisation des recouvrements contenant du TBT. Or, depuis cette époque, peu de nouvelles initiatives ont été présentées afin de poursuivre le resserrement législatif des composés antisalissures utilisés. Il apparaît aujourd'hui que les énergies sont davantage dirigées vers la gestion des GES et l'émission de contaminants de toutes sortes dans les eaux (eaux de ballast, vidanges des eaux usées, déversements accidentels, etc.).

Pareillement, les deux parties prenantes (IMO et le gouvernement canadien) accordent une importance toute particulière à la prévention et à la gestion des EEE. Avec les années passées et les connaissances acquises, il y a constatation que la gestion des EEE est une problématique de plus grande envergure et dont les impacts se font sentir à très brève échéance.

## **6. LES SECTEURS DE RECHERCHE DES PRODUITS ANTISALISSURES**

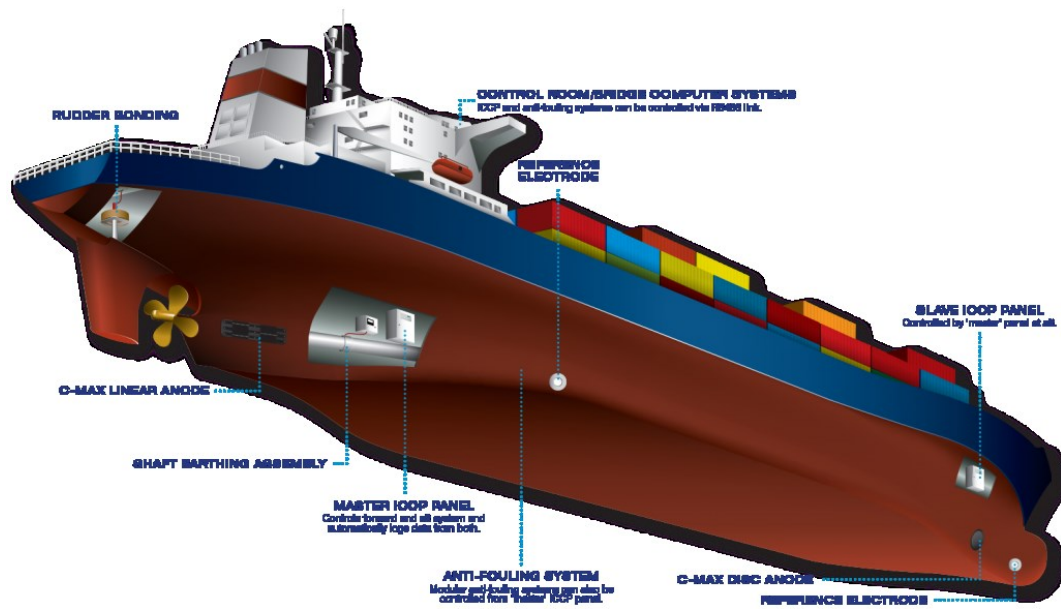
Les premières recherches (1500 avant J.-C. à 300 avant J.-C.) pour trouver des produits antisalissures efficaces se sont majoritairement orientées vers les composés incorporants des atomes métalliques. Le premier produit commercialisé à grande échelle était le TBT composé d'étain. Or, lorsque le TBT a été banni des marchés, les produits de remplacement qui ont rapidement été adoptés ont tous la particularité d'être à base de cuivre. (Dafforn et al., 2011)

Cependant, alors que la chimie moderne se raffine et que les technologies évoluent, le nombre de solutions potentielles se multiplie tout en se distinguant de l'approche initiale (le TBT), soit l'incorporation d'un biocide à base métallique qui agit en tant que barrière chimique pour protéger les coques des navires.

Dans les sections ci-dessous, diverses approches sont actuellement en développement afin de découvrir de nouvelles solutions alternatives aux peintures antisalissures présentement utilisées. Néanmoins, ces solutions exposées ne reflètent pas la totalité des solutions testées. Par exemple, une grande partie de la recherche se fait dans le secteur privé et peut ne pas avoir fait l'objet de publications jusqu'à aujourd'hui. Néanmoins, les pistes de recherches résumées exposent les solutions les plus prometteuses.

### **6.1. Les cathodes et anodes**

Une des avenues possibles est l'ajout d'anodes et de cathodes aux coques des navires. Cette approche aurait le même mode de fonctionnement que la barrière chimique des produits antisalissures actuels, mais la barrière serait électrique (Ricardou, 2018). C'est par le phénomène de la corrosion électrolytique où un courant électrique se forme entre deux métaux immergés que l'anode est sacrifiée à l'oxydation afin de préserver le reste des métaux sous l'eau. Ainsi, le métal composant la coque est protégé de l'oxydation par le système anode/cathode et c'est le contact métal/métal et métal/eau qui permet une performance maximale. Ainsi, le recouvrement des pièces métalliques immergées par les organismes marins vient réduire les performances de ces systèmes, car ces organismes créent une barrière aux transferts d'électrons en agissant comme isolant électrique.



**Figure 6.1 : Le fonctionnement et le positionnement d'un système cathode et anode sur un navire** (tiré de : Cathelco Limited, 2018).



**Figure 6.2 : Photo d'une anode de zinc sur un navire de moins de 24 mètres de longueur** (tiré de : Kaupp, 2018).

### **6.1.1. Les avantages**

Un des avantages majeurs est la non-dispersion de substances dans les eaux entourant le navire. Ce faisant, l'utilisation de ce type de système est sécuritaire pour les milieux naturels sensibles. Également, la maintenance des pièces d'usure coïncide avec les maintenances usuelles en cale sèche, ce qui ne demande pas d'arrêt des opérations pour ce système.

### **6.1.2. Les inconvénients**

Parmi les inconvénients, il y a notamment le coût d'acquisition de ce type de système. Étant donné que la protection cathodique est dépendante des composantes du système, plus le navire sera gigantesque et plus les composantes devront être de forte puissance électrique voire d'avoir des systèmes en parallèle (par la multiplication des anodes afin d'avoir une bonne couverture protégeant l'ensemble de la coque et des installations électriques nécessaires). Le coût est proportionnellement majoré à la hausse de la surface protégée.

Un second inconvénient est la maintenance de ce type de système. En effet, l'incorporation de contrôleurs, d'ordinateurs de suivi et de senseurs permet d'avoir un système optimal, mais cela occasionne également autant de systèmes sujets à une défectuosité durant l'utilisation. Or, les réparations de ces systèmes sont laborieuses, car ils requièrent des instruments particuliers et le mode de fonctionnement du système est unique à bord du navire.

Également, l'anode qui est sacrifiée au bénéfice du maintien des autres pièces métalliques est usuellement faite de zinc, car c'est le métal ayant la plus grande facilité à s'oxyder. Ainsi, le désagrégement continu de l'anode occasionne une dispersion de zinc dans l'environnement. Or, le zinc est une substance toxique et de faibles concentrations engendrent un haut taux de mortalité pour certains organismes, notamment certaines larves d'insectes (*Ephemerella subvaria*) et d'œufs de poissons (*Pimephales promelas*) (Jelmert et Van Leeuwen, 2000).

Un dernier inconvénient est la consommation continue d'électricité afin de maintenir la protection cathodique. Les systèmes et la protection peuvent varier en fonction des réglages ou des marques des compagnies, mais les expérimentations concernant les protections cathodiques en laboratoires permettent d'obtenir les données de voltage et de courant minimales afin de protéger les coques en acier dans les eaux salines. Ces valeurs sont représentées aux figures 6.3 et 6.4. À cela, il faut multiplier la

surface de la coque à protéger, ce qui occasionne de grandes demandes énergétiques de manière continue.

Métal	Potentiel (Cu/CuSO <sub>4</sub> )
Acier	- 850 mV
Acier (en présence de bactéries sulfato-réductrices)	- 950 mV
Alliage de cuivre	- 500 à – 650 mV
Plomb	- 600 mV
Aluminium	- 950 à -1 200 mV

**Figure 6.3 : Les potentiels électriques requis afin de protéger divers métaux** (tiré de : FRANCIS, s.d.).

Environnement	Intensité de courant (A m <sup>-2</sup> )
Solutions acides	350 – 500
Solutions salines	0,3 – 10
Eau de mer	0,05 – 0,15
Boue saline	0,025 – 0,05

**Figure 6.4 : Les courants requis pour la protection de l'acier dans divers milieux** (tiré de : FRANCIS, s.d.).

### 6.1.3. Les inconnus

Parmi les questionnements, la concentration des installations cathodiques est un facteur à surveiller. Un peu comme l'abondance des navires en Californie qui provoquait, même si les concentrations des agents biocides dans les produits approuvés sont faibles, une forte présence des composés cuivrés dans les eaux des baies. Alors que certaines études commencent à démontrer que la forte utilisation des sonars ou les bruits excessifs dans les milieux marins perturbent les organismes vivants (British Columbia

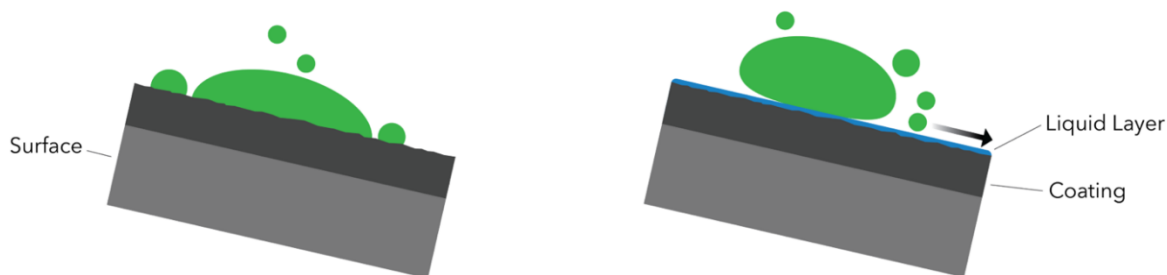
Ministry of Energy and Mines, 2003), il serait pertinent de se questionner sur les impacts qu'aurait ou qu'aura une forte concentration de systèmes cathodiques et de champs électriques.

Également, cette technique de protection est connue depuis plusieurs décennies et où des essais ont été réalisés dans années 1970. Un rapport commandé par la U.S. Navy datant de 1974 démontre que les aspects techniques étaient déjà en cours de recherches (Hack, Miller et Davis, 1974).

## 6.2. Le développement de surface liquide

Une nouvelle approche consiste à tromper les organismes marins qui s'accrochent aux parois immergées. Cette approche repose sur l'observation que les organismes marins cherchent à s'accrocher aux parois marines afin d'être solidement ancrés. Or, lorsque la surface où les organismes marins tentent de s'accrocher ne répond pas aux normes d'une surface dure, l'organisme ne se fixe pas à cette surface et cherche un meilleur endroit pour s'accrocher. Selon les recherches, le signal donné aux organismes marins qui essaient de se fixer sur une surface liquide correspondrait à une surface qui tire plutôt que de faire opposition, c'est-à-dire que la surface ne serait pas jugée assez solide et créerait une sensation d'instabilité à l'organisme marin. Essentiellement, le produit appliqué est un silicone flexible avec une couche lubrifiante. (Kavin, 2018)

La figure 6.5 montre le détail d'un organisme marin qui, en ne s'accrochant pas à la surface traitée, est déplacé par le courant vers d'autres surfaces.



**Figure 6.5 : Le fonctionnement d'une surface liquide** (tiré de : Adaptive Surface Technologies, Inc., s.d.).



### 6.2.1. Les avantages

Un des avantages est l'application facile de ce produit où, comme la peinture, un employé non spécialisé peut peindre la coque d'un navire (voir la figure 6.6).

Un avantage important est la non-dispersion théorique de produits chimiques tout au long de la durée de vie du revêtement. En effet, puisque ce sont les propriétés physiques et non chimiques qui sont utilisées, le matériel utilisé reste intact (non-dégradation).



**Figure 6.6 : L'application d'un revêtement de surface liquide** (tiré de : Kavin, 2018).

### 6.2.2. Les inconvénients

Concernant les inconvénients, il y a peu de documentations sur cette approche technologique. Étant donné que les essais sont toujours en cours à petite échelle sur certains navires-cobayes et les approbations des autorités gouvernementales ne sont pas encore obtenues, il est difficile de voir les impacts environnementaux ainsi que les études toxicologiques effectuées à ce jour. Néanmoins, la compagnie espère avoir toutes les approbations requises pour un déploiement à plus large amplitude au cours de 2019. Or, ce ne sera que suite aux publications des résultats des tests qu'il sera possible de mieux évaluer les impacts environnementaux.

### 6.2.3. Les inconnus

Très peu de données sont accessibles au public, les essais réels se sont déroulés sur une courte période de temps alors que les maintenances usuelles se déroulent aux cinq ans. Ainsi, le comportement du composé chimique n'est pas connu sur un long terme d'utilisation ni sur un cycle complet d'utilisation réelle.

D'autre part, les connaissances actuelles sur les composés à base de silicone exposent des risques pour l'environnement, tant pour la santé humaine que pour les risques de bioaccumulation dans les écosystèmes lorsqu'il y a un caractère lipophile élevé. (Environnement Canada et Santé Canada, 2010) et (Gazette du Canada, 2006)

Finalement, les régions où ont eu lieu les tests sont majoritairement dans des eaux chaudes océaniques en comparaison aux eaux froides du Canada ou par rapport à des eaux douces telles que le Golf du Saint-Laurent.



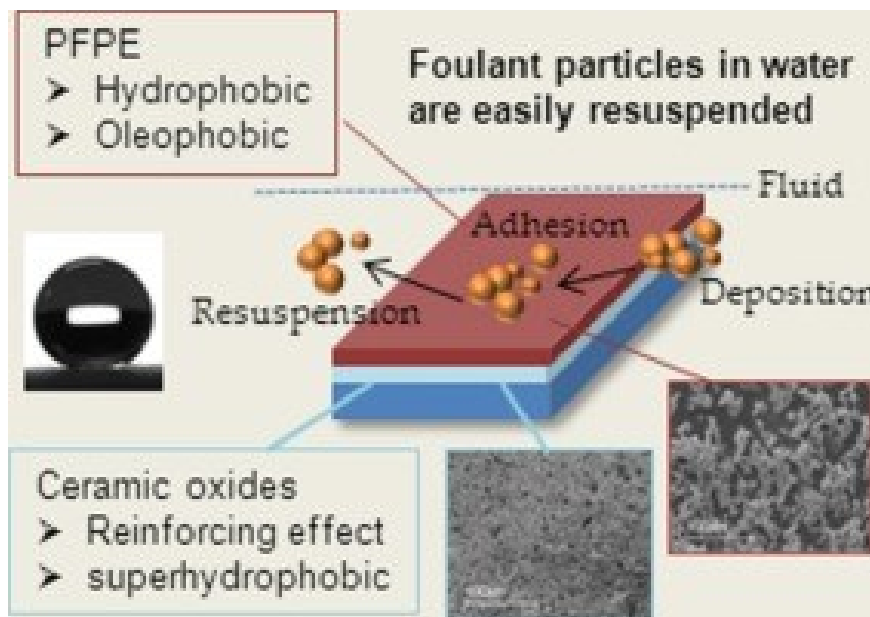
**Figure 6.7 : Les régions où les essais des produits simulant une surface liquide ont eu lieu** (tiré de : Adaptive Surface Technologies, Inc., s.d.).

Pour conclure, plus de données et de résultats d'expérimentations sont requis afin de définir l'empreinte environnementale des produits à base de silicone. Une autorisation de commercialisation et d'usage pour les navires commerciaux, dans un avenir rapproché, permettra de mieux évaluer les performances du produit dans des conditions réelles d'utilisation.

### 6.3. Les surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie

Les surfaces à faible niveau d'énergie sont définies comme telles suite à la constatation de leur propriété de surface très lisse qui limite l'adhérence des organismes marins. Ainsi, pour retirer une salissure ayant colonisé une telle surface, une faible intensité énergétique est requise afin de séparer l'organisme de la coque.

Les surfaces glissantes et les céramiques ont approximativement le même comportement physique, c'est-à-dire qu'un produit est appliqué sur la coque afin de rendre la coque très glissante. Ainsi, lorsque le navire atteint sa vitesse de croisière, les microorganismes n'ont qu'une prise très limitée sur la coque et les courants d'eau détachent ses organismes avant d'arriver à destination. La figure 6.8 représente bien ce processus d'éjection des microorganismes lors de la navigation à haute vitesse.



**Figure 6.8 : Les céramiques empêchent l'adhérence des microorganismes sur la coque en rendant la paroi totalement lisse (tiré de : Oldani et al., 2015).**

### **6.3.1. Les avantages**

Un grand avantage est la non-dispersion d'agent chimique dans les eaux environnantes du navire. Cette approche n'influence en rien les écosystèmes marins, car le navire n'émet ni composés chimiques ni influences magnétiques autour de lui.

Par ailleurs, la propriété des céramiques de conduire à un fini très lisse est un avantage opérationnel des navires puisque, tel que mentionné dans la section 1.1.1, le fini de surface est un facteur direct de la trainée du navire et incidemment, de sa consommation de carburant. Par conséquent, avoir une protection antisalissure à base de céramique permettrait une protection de la coque tout en améliorant les performances des navires.

### **6.3.2. Les inconvénients**

Les principaux inconvénients touchent la maintenance. En effet, certaines céramiques demandent un entretien sous-marin en fonction des conditions marines, notamment dans les eaux chaudes qui favorisent le développement rapide des microorganismes marins. Aussi, la préparation avant l'application est plus exigeante, car il faut enlever les couches de peinture antérieures. (Georgia Strait Alliance, 2008)

### **6.3.3. Les inconnus**

Aussi, la formule plus appropriée de revêtement en céramique étant toujours en développement, le composé optimal n'a pas encore été sélectionné. Or, les propriétés mécaniques des céramiques sont usuellement une grande dureté, mais aussi une fragilité (faiblement ductile). En étant appliqué sur une coque de navire, il est concevable que les contraintes mécaniques de la coque soient transmises au revêtement de céramique.

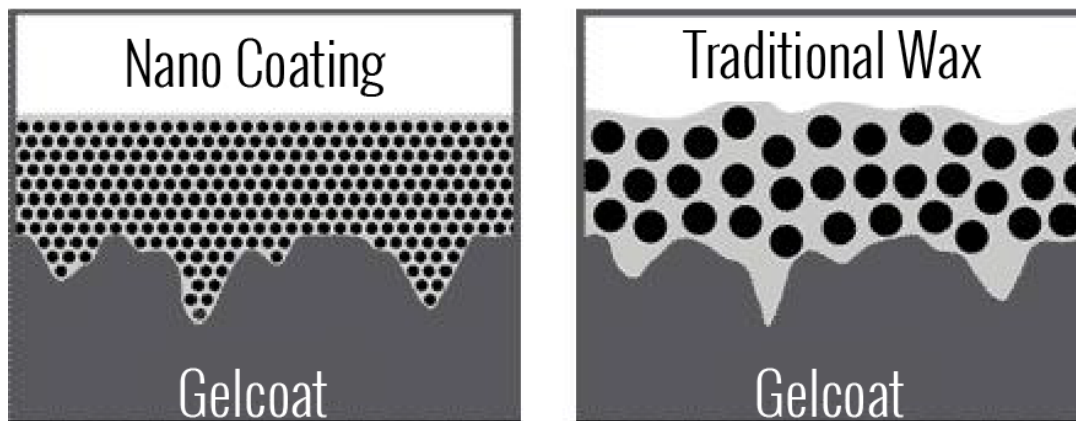
Également, les céramiques sont généralement inertes chimiquement, mais certains recouvrements glissants peuvent inclure une certaine teneur de composés autres que la matrice de céramique (par exemple les téflons) ayant des impacts environnementaux. De plus, la nature des opérations où seront utilisés ces produits engendre des risques d'usure par abrasion par les éléments naturels (glace, vague, fonds marins, etc.).

#### 6.4. Les nanotechnologies

Finalement, un des derniers secteurs en expansion est le développement des nanotechnologies. Actuellement, dans le domaine maritime, c'est un vecteur de recherche très étudié, mais les applications à grande échelle ne sont pas encore développées. Les essais et le développement sont toujours en cours avec des résultats intéressants, mais la technologie des nanoparticules reste à être améliorée afin d'exploiter pleinement le potentiel de cette approche.

L'utilisation des nanoparticules en tant qu'agent antisalissure découle de la possibilité d'utiliser des particules à très fine échelle afin de construire de nouvelles structures de matériaux tout en exploitant les propriétés physiques de structures complexes. (Khanna, 2008)

Le recours à la nanotechnologie est dans la même veine que le recours aux surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie, c'est-à-dire que l'objectif est de réduire les irrégularités des surfaces afin de rendre réduire l'adhérence des microorganismes. Le mariage entre les nanoparticules et la surface de la coque est alors optimal. La figure 6.9 schématise cet alignement moléculaire.



**Figure 6.9 : Le mode d'action des nanoparticules** (tiré de : Marine Nano Shop, 2017).

##### 6.4.1. Les avantages

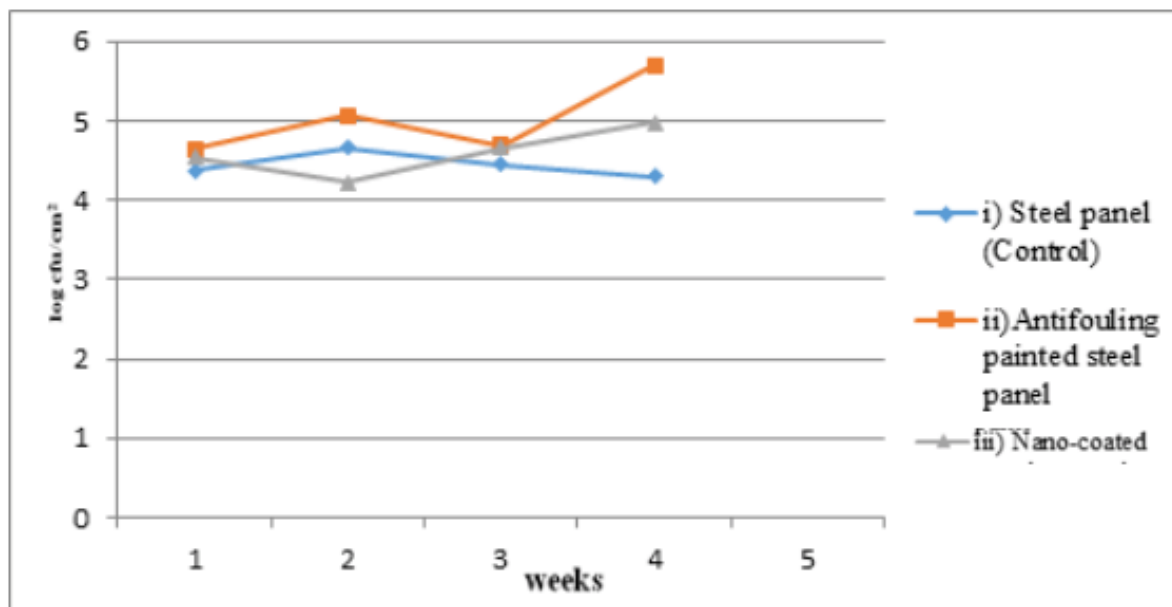
Les avantages des nanoparticules sont les mêmes que les surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie, c'est-à-dire une finition de surface grandement améliorée par rapport aux méthodes utilisées actuellement. L'avantage supplémentaire des nanotechnologies est qu'il est

possible de manipuler les molécules afin de favoriser un alignement particulier, de moduler des structures internes ou de favoriser un agencement spécifique des molécules.

#### 6.4.2. Les inconvénients

Aujourd'hui, les essais de nanoparticules ne se sont pas avérés totalement concluants. Alors que certaines caractéristiques recherchées ont été atteintes, quelques inconvénients sont également apparus lors des tests réels. Incidemment, les produits développés nécessitent le recours à plusieurs couches de molécules différentes afin de rendre le revêtement antisalissure résistant aux changements de température, aux contraintes mécaniques, pour accroître la flexibilité, etc. (Khanna, 2008)

D'autre part, certains centres universitaires ont commencé des essais et les publications font état de rendements acceptables, mais non supérieurs aux produits actuellement utilisés sur le marché. La figure 6.10 démontre la performance d'un revêtement à base de nanoparticules sur une plaque d'acier en comparaison avec un panneau vierge et d'un panneau recouvert d'une peinture. L'échelle utilisée ( $\text{CFU}/\text{cm}^2$ ) représente le nombre de colonies de microorganismes formées par unités (*colony-forming unit*).



**Figure 6.10 : La comparaison du nombre de colonies sur d'un panneau d'acier avec trois types de recouvrements** (tiré de : Archana, Sundaramoorthy, Neethiselvan et Jeyashakila, 2017).

Les résultats du recours aux nanoparticules sont prometteurs, mais comme toute nouvelle technologie émergente, les formulations chimiques se doivent d'être peaufinées afin d'être une alternative intéressante pour les industriels.

#### 6.5. Les couts et les rendements

La technologie est en constante progression et les alternatives aux recouvrements antisalissures à base de composés de cuivre sont actuellement disponibles. Cependant, un facteur pesant lourdement dans les prises de décisions est les couts engendrés par ces méthodes proposées.

La figure 6.11 représente une généralité des couts pour chacune de ces approches technologiques ainsi que leur efficacité. Les descriptions des technologies sont précisées dans le tableau 6.1.

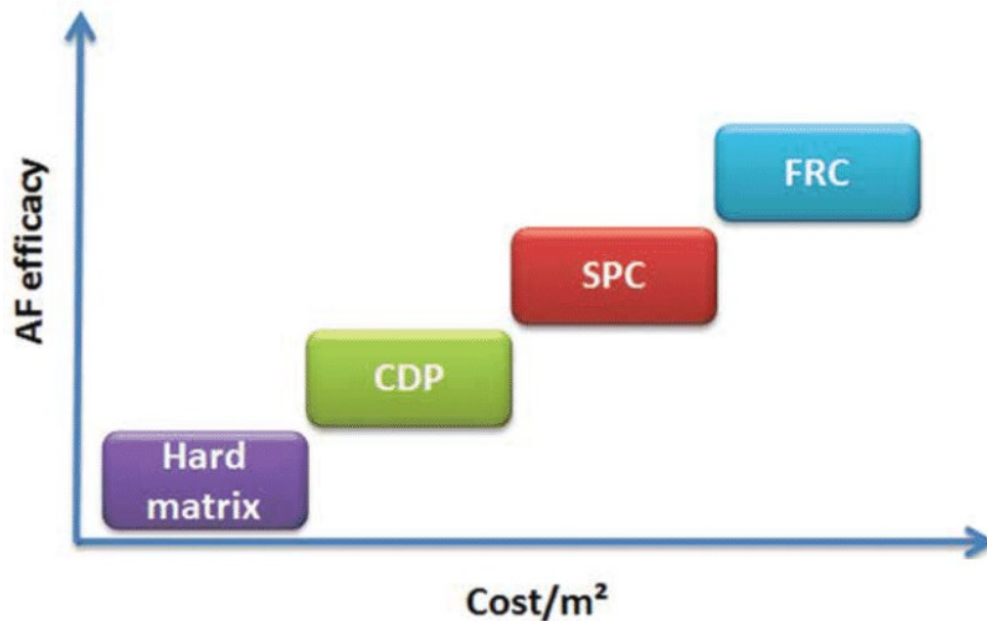


Figure 6.11 : Les couts en fonction des efficacités (tiré de : Bressy et Noblet Lejars, 2014).

**Tableau 6.1 : Exemples d'applications technologiques dont les coûts ont été évalués**

Technologies	Exemples
Matrice rigide et poreuse libérant un agent chimique (Hard matrix)	La technologie utilisée pour le TBT
<i>controlled depletion polymer</i> (CDP)	C'est l'ancienne technologie pour les composés cuivrés où la matrice libère les produits de manière contrôlée dans le temps. C'est l'équivalent du <i>hard matrix</i> mais avec une régularité.
<i>self-polishing copolymer</i> (SPC)	C'est une matrice à dégradation en fonction du frottement avec les vagues. C'est la technologie actuellement utilisée pour les composés cuivrés.
<i>fouling release coating</i> (silicone) (FRC)	C'est l'approche de la surface liquide, des surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie.

Pour ce qui touche les approches cathodiques et nanotechnologiques, les expériences à grande échelle et les utilisations lors des opérations de transport n'étant que fragmentaires, il n'est pas possible de les catégoriser précisément. Les développements technologiques sont onéreux et le marché est actuellement limité, les coûts ne sont pas encore amortis et donc peu comparables avec les produits de masse disponibles sur le marché.

D'autre part, un fabricant de produits antisalissure a détaillé sur son site web des comparatifs entre ses divers produits offerts sur le marché. La comparaison des rendements est présentée à la figure 6.12 et les économies monétaires à la figure 6.13. Par rapport à l'étude présentée précédemment, la compagnie donne des chiffres plus précis, mais ne mentionne pas si ce sont des moyennes ou des rendements maximaux, mais pour certains rendements, il est indiqué sur le site que ce sont des prédictions. Les définitions sont présentées dans le tableau 6.2.



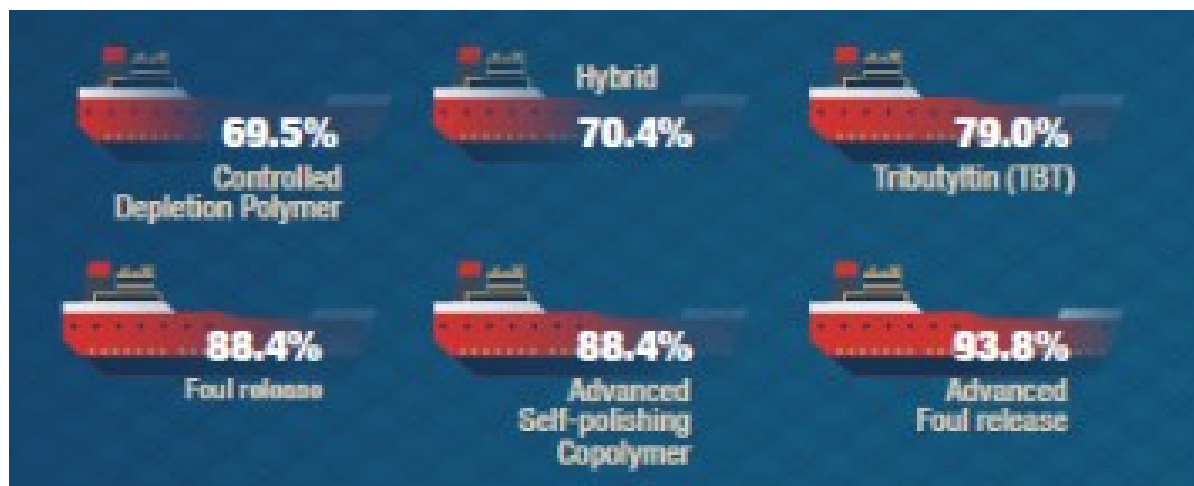


Figure 6.12 : La performance des revêtements actuellement présents sur les navires (tiré de : Wezenbeek, s.d.).



Figure 6.13 : Les économies potentielles générées après cinq années d'utilisation des diverses méthodes antisalissures (en dollars américains) (tiré de : Wezenbeek, s.d.).

**Tableau 6.2 : Les descriptions des technologies évoluées**

Descriptions	Définitions
<i>Controlled depletion polymer</i>	C'est l'ancienne technologie pour les composés cuivrés où la matrice libère les produits de manière contrôlée dans le temps. C'est l'équivalent du <i>hard matrix</i> mais avec une régularité.
<i>Hybrid</i>	Une combinaison du <i>Controlled depletion polymer</i> et du <i>Advanced Self-polishing copolymer</i> .
TBT	C'est le premier produit commercialisé comme substance antisalissure.
<i>Advanced Self-polishing copolymer</i>	C'est une matrice à dégradation en fonction du frottement avec les vagues. C'est la technologie actuellement utilisée pour les composés cuivrés.
<i>Foul release</i>	C'est l'approche de la surface liquide, des surfaces glissantes, les céramiques et les surfaces à faible niveau d'énergie. (International Paint LLC, s.d.)
<i>Advanced Foul Release</i>	C'est la nouvelle technologie développée par la compagnie <i>International Paint</i> qui consiste à avoir recourt aux produits amphiphiles. Cette technologie est basée sur un composé polymère-fluor. (MATERIALS PERFORMANCE, 2015)

La compagnie *International Paint* entrevoit que la prochaine génération de produits antisalissures sera composée de substances amphiphiles (une molécule amphiphile se compose d'un regroupement hydrophile et un regroupement hydrophobe) tout comme certaines autres compagnies anticipent que c'est l'approche nanotechnologique qui sera la plus prometteuse. Néanmoins, les avancements anticipés dans les propriétés antisalissures et dans les économies opérationnelles seront en progression afin de justifier les investissements de la part des armateurs et afin d'offrir un produit ayant une empreinte environnementale réduite pour satisfaire aux exigences légales.

## 6.6. Le déroulement des essais

Les essais sont le cœur central de la recherche scientifique sur les produits antisalissures. C'est par des validations terrain que les composés sont validés ou écartés. La principale difficulté réside dans la diversité des milieux marins (eaux douces et eau de mer) et dans la diversité des microorganismes. Ainsi, il est complexe de développer des systèmes de protection pour les coques de navires qui peuvent être performants pour l'ensemble des milieux marins. En effet, les milieux marins varient en fonction de leur localisation géographique et les tolérances biologiques intrinsèques à chacun de ces organismes obligent une fine gestion entre un agent protecteur efficace et une dose létale pour une partie de l'écosystème marin.

La figure 6.14 représente un montage pour effectuer des essais de nouveaux composés antisalissures où les efficacités sont déterminées en comparant divers produits entre eux. Puisque plusieurs facteurs influencent l'environnement des tests, notamment la saison, la température de l'eau et la composition chimique de l'eau. Ce n'est que par une comparaison directe qu'il est possible de bien évaluer le pouvoir protecteur d'un produit antisalissure.



**Figure 6.14 : Un banc d'essai pour l'acquisition de résultats sur une coque de bateau** (tiré de : Bressy et Noblet Lejars, 2014).

## **7. LES RECOMMANDATIONS**

Les produits antisalissures sont des substances qui sont largement utilisées par les armateurs de navires de transport. Or, les impacts environnementaux de ces substances ne sont pas négligeables et les prévisions futures anticipent une hausse marquée des volumes utilisés. Cependant, plusieurs options sont disponibles aux législateurs afin de mieux encadrer ces produits. Les différentes options proposées dans ce rapport peuvent se classer sous trois thématiques, soit les thématiques législative, opérationnelle et internationale.

### **7.1. Les aspects législatifs**

Parmi les recommandations touchant les aspects légaux, certaines nouvelles dispositions devraient être envisagées. Les aspects suivants représentent des points où une attention particulière devrait être portée.

#### **1 - Inclure les paliers gouvernementaux inférieurs**

Une première recommandation serait l'élargissement de la responsabilité des acteurs régissant les produits antisalissures. C'est-à-dire qu'actuellement, seul le gouvernement fédéral a les pouvoirs législatifs de règlementer les produits attribués aux usages de la navigation. Or, les impacts engendrés par l'usage de ces produits sont perceptibles tant aux niveaux régionaux que locaux. Incidemment, outre le mécanisme où les populations locales et les gouvernements provinciaux peuvent faire des démarches et des pressions sur le législateur fédéral, un partage des pouvoirs doit être considéré afin de responsabiliser l'ensemble des parties prenantes. Tel que démontré avec les EEE, la réglementation maritime est à la charge du gouvernement fédéral alors qu'une bonne partie de la gestion des problématiques causées par les EEE est de responsabilité provinciale.

#### **2 - Créer des régions géographiques pour l'utilisation des produits antisalissures**

D'autre part, la législation en place a une approche globale de réglementation des substances où la toxicité a été démontrée, mais elle n'est pas proactive concernant les spécificités uniques de certaines régions du pays. Par exemple, les espèces maritimes en eau salée ne sont pas les mêmes que les espèces en eau douce. Conséquemment, une approche régionale devrait être considérée et mise en place afin d'assurer la protection de la biodiversité et de l'environnement tout en conservant une flexibilité des produits approuvés. Cette approche éviterait le bannissement unilatéral de produits qui peuvent s'avérer recommandables dans certaines conditions ou sous certains aspects. Également, cette approche permettrait un resserrement des normes dans les écosystèmes les plus fragiles.

### 3 - Identifier et surveiller les écosystèmes sensibles

Une autre recommandation serait de réévaluer les accréditations des produits antisalissures en fonction des nouvelles réalités maritimes. Par exemple, le développement de nouvelles routes maritimes tel que le passage maritime du Nord-Ouest dans l'arctique canadien (l'Encyclopédie Canadienne, 2015) est un milieu vierge de la navigation commerciale. Or, les réchauffements climatiques bouleversent ce qui était jadis considéré comme un passage périlleux et impraticable et font en sorte que la navigation est désormais envisagée sur une base régulière (Josselin, 2017). Cependant, ce milieu inaltéré est unique par sa fragilité où des nombreuses espèces ne sont pas encore répertoriées. Une classification spéciale des produits antisalissures utilisés serait à être considérée pour ces milieux uniques. Alors que pour cette région, il existe des lignes directrices spécifiques pour les navires de passagers afin de rendre le voyage plus sécuritaire et plus respectueux du milieu marin (Transport Canada, 2018a), la même approche devrait être suivie pour les navires transportant de la marchandise et ce, peu importe les cours d'eau navigués.

### 4 - Restreindre la navigation dans les zones les plus vulnérables

Également, des restrictions sur les navires circulant dans des milieux vulnérables devraient être mises en place afin d'éviter les erreurs du passé où le manque de vigilance voire l'absence de contrôle a engendré une négligence quant aux mesures à suivre de la part des bateaux. Ainsi, les navires utilisant des revêtements antisalissures à base de composés cuivrés devraient être limités à certaines eaux et les navires utilisés dans les zones vulnérables devraient être sans revêtements antisalissures, mais être conscrits à naviguer seulement dans ces zones fragiles.

## 7.2. Les aspects opérationnels

Parmi les aspects opérationnels, plusieurs actions peuvent être prises. Mais seulement quelques-unes seront présentées ci-dessous.

### 5 – Nettoyer les coques sur une base périodique

En premier lieu, le nettoyage des coques des navires s'effectue usuellement sur une base périodique. Or, un navire tout comme une voiture se doit d'être régulièrement inspecté et entretenu afin d'assurer son bon fonctionnement. Un contrôle de la fréquence des nettoyages des coques et des obligations à assainir efficacement les coques devraient être des requis afin d'obtenir l'autorisation de naviguer dans les eaux canadiennes. De la même manière que Transport Canada contrôle les certificats des substances antisalissures appliqués sur les coques, un tel contrôle permettrait de valider que les produits les plus performants sont utilisés et que leur efficacité est maintenue.

## 6 – Définir les concentrations maximales des biocides dans l'environnement

En second lieu, tout en considérant que les volumes transportés par les navires marchands sont en hausse telle que les projections anticipées, une évaluation des écosystèmes devrait être faite afin de mieux définir les capacités de supports des milieux marins. Incidemment, même si les substances antisalissures sont plus performantes et que les concentrations dispersées dans l'environnement diminuent par navire, l'augmentation anticipée du nombre de navires ou des volumes commerciaux permet d'envisager une augmentation des substances chimiques émises dans l'environnement. Or, cette tendance se doit d'être inversée afin d'assurer la pérennité des milieux portuaires. Un encadrement des concentrations des agents biocides dans les produits autorisés devrait être envisagé.

## 7 – Encadrer la manipulation des produits antisalissure par des professionnels formés

Une restriction sur certains produits antisalissures devrait être décrétée dans les écosystèmes les plus sensibles ou les plus fragiles. Alors que la majorité des produits qui repoussent les films organiques sont à base de cuivre, de nouvelles approches devraient être examinées afin de diversifier les solutions possibles. Une plus grande variété d'alternatives permettrait de mieux identifier les besoins et de développer une solution ciblant expressément le besoin. Par exemple, les besoins d'un navire de plaisance utilisé occasionnellement sont différents par rapport à un navire marchand constamment en déplacement ou d'une installation fixe tel un quai ou une plateforme de forage. Également, les modes d'application demandent plus de connaissances techniques où les produits exigent de multiples couches et où les revêtements recommandés diffèrent selon la composition de la coque du navire (coques en aluminium, en acier, en bois, etc.).

### 7.3. Les aspects internationaux

Le volet international permet non seulement d'afficher les intentions du Canada d'être un meneur dans la protection de l'environnement, mais également d'établir des standards auprès des autres pays entourant les eaux canadiennes.

## 8 – Déployer des stratégies en synergie avec les principaux partenaires commerciaux

En ce qui touche les aspects internationaux, le Canada devrait jouer un rôle de meneur dans les politiques internationales. Étant donné que le pays est bordé par trois océans et comporte de nombreux cours d'eau, le Canada est fortement exposé aux introductions d'espèces envahissantes transportées par les activités maritimes. Or, la protection des écosystèmes fragiles et des cours d'eau intérieurs tels que le fleuve Saint-Laurent et les Grands Lacs est une responsabilité des autorités actuelles envers les générations futures. Incidemment, plutôt que d'être à la remorque des conventions internationales, une approche proactive serait de prendre part aux discussions charnières avec les principaux joueurs et de

mettre en place, de manière concertée, des exigences mettant le Canada à l'avant-garde en ce qui touche la protection des aires maritimes et des politiques locales concernant les concentrations maximales acceptables des polluants dans les revêtements antisalissures selon les écosystèmes présents.

#### 9 – Uniformiser les exigences

D'autre part, une concertation avec les grands pôles maritimes, notamment les États-Unis, l'Union européenne et l'Asie, doit être faite afin de favoriser une homogénéité des normes et d'éviter les doubles standards et les contradictions réglementaires. Plutôt que d'opter pour des réglementations locales, diverses et variables, une codification internationale serait bénéfique pour tous et permettrait d'avoir un référentiel unique. Cette uniformisation n'empêcherait pas les gouvernements d'être libres de décision, mais elle faciliterait les contrôles et permettrait une meilleure cohésion. Par exemple, dans cet essai, quelques échelles ont été décrites dont : la concentration de produit actif dans les recouvrements, les taux de diffusion des agents biocides dans l'environnement, la concentration maximale des agents actifs dans les eaux de navigations, etc. qui sont toutes des échelles de contrôles différentes.

#### 10 – Solliciter une reconnaissance internationale des écosystèmes marins uniques au Canada

Alors que certains pays ont des spécificités locales exceptionnelles, notamment la grande barrière de corail pour les pays de l'Océanie, qui exigent une protection unique du milieu naturel, le Canada doit prendre exemple sur ces pays qui décrètent de sévères restrictions tant au niveau des recouvrements antisalissures que pour le nettoyage des coques. En effet, l'Australie oblige l'utilisation de recouvrements non toxiques voire la non-utilisation de produits antisalissures tout en obligeant un nettoyage périodique des coques de navires. Cependant, alors que la création du film primaire est quasi impossible à enrayer sans utilisation de protection, le contrôle des couches subséquentes, soit les créations de la microcouche et de la macrocouche sont plus facilement évitables par une surveillance accrue afin d'éviter leurs apparitions. (Great Barrier Reef Marine Park Authority, s.d.) Une reconnaissance de site unique par l'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) vient effectivement avec des obligations de préservation par l'état où se trouve le site unique, mais c'est également une responsabilité partagée avec tous les états membres de l'UNESCO dont sa charte stipule que tous les états membres prennent un engagement commun envers les générations futures. (UNESCO, s.d.-a) Ainsi, une telle reconnaissance de site unique permettrait de promouvoir plus efficacement les mesures de protection pour ces emplacements auprès des autres pays et éventuellement, d'adopter une approche commune aux sites marins de l'UNESCO.

## CONCLUSION

Le recours aux produits antisalissures permet aux armateurs d'avoir des navires plus efficaces d'un point de vue énergétique et ces substances représentent un levier majeur dans la prévention des espèces exotiques envahissantes (EEE). Alors que les premiers revêtements étaient à base de TBT et que la démonstration de leurs effets nocifs sur la vie marine s'est traduite par leurs bannissements, les composés utilisés aujourd'hui sont majoritairement à base de cuivre. Néanmoins, les composés cuivrés ont des impacts environnementaux non négligeables sur les milieux marins, particulièrement les milieux sensibles. Incidemment, certains pays implémentent des restrictions et révisent régulièrement leurs lois afin d'adapter les concentrations maximales mesurées en nature aux seuils de tolérances de ces milieux. Les prévisions internationales et locales permettent d'anticiper une hausse continue du nombre des bateaux sillonnant les eaux internationales et canadiennes et l'établissement de nouvelles routes maritimes se développeront dans un avenir rapproché. Une approche proactive de la part des gouvernements est donc essentielle. Or, le manque d'objectifs définis du gouvernement fédéral et le manque de consensus international retardent la mise en place de nouvelles mesures. Du point de vue de la recherche scientifique, les deux témoignages ont permis de souligner l'importance de soutenir les partenariats milieux académiques et entreprises et de faciliter l'entrée de nouveaux produits sur le marché. Remettre en question les manières de faire usuelles permet d'améliorer les pratiques et de promouvoir l'innovation.

Toutefois, une réorientation des politiques prônant une approche durable des produits antisalissures est possible et repose sur trois principaux axes. Le premier axe est législatif afin d'élargir les responsabilités des parties prenantes et de mieux encadrer l'utilisation des revêtements des coques des navires. Dans un deuxième temps, une stratégie opérationnelle ou un contrôle plus serré des pratiques permettrait de minimiser les risques de comportements déviants et d'avoir une meilleure connaissance des milieux naturels. En dernier lieu, une approche internationale intégrée est préconisée afin de mieux encadrer les usages des produits utilisés et d'octroyer une reconnaissance transnationale des milieux uniques au Canada.

Évidemment, il n'existe pas de solution sans impact sur l'environnement tout comme il n'existe pas de solution unique. Une approche plurisectorielle permettra d'amenuiser les inconvénients tout en conservant les avantages opérationnels et de contrôler les EEE avec les produits antisalissures. Au cours des prochaines années, les développements technologiques et le raffinement des approches actuellement en développement permettent d'anticiper des solutions plus respectueuses de l'environnement, que ce soit pour les navires ou les installations fixes.



## RÉFÉRENCES

- Adaptive Surface Technologies, Inc. (s.d.). Marine Coatings – Adaptive Surface Technologies, Inc. Repéré à <https://adaptivesurface.tech/marine-coatings/>
- Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire de Santé Canada. (2016). *Évaluation environnementale des pesticides contenant du cuivre utilisés comme agents de préservation du bois, agents de préservation des matériaux ou revêtements antisalissures* (n° RVD2016-09). Repéré à [https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/cps-spc/alt\\_formats/pdf/pubs/pest/\\_decisions/rvd2016-09/rvd2016-09-fra.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/cps-spc/alt_formats/pdf/pubs/pest/_decisions/rvd2016-09/rvd2016-09-fra.pdf)
- Alzieu, C. L., Sanjuan, J., Deltreil, J. P. et Borel, M. (1986). Tin contamination in Arcachon Bay: Effects on oyster shell anomalies. *Marine Pollution Bulletin*, 17(11), 494-498. doi:10.1016/0025-326X(86)90636-3
- Alzieu, C., Thibaud, Y., Heral, M. et Boutier, B. (1980). Estimation of the dangers caused by the use of antifouling paints in the growing oyster areas. *Rev Trav Inst Pêches Marit (0035-2276) (ISTPM)*, 44(4), 305-348.
- Amara, I., Miled, W., Slama, R. B. et Ladhari, N. (2018). Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment. A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 57, 115-130. doi:10.1016/j.etap.2017.12.001
- Amara, R. (2010). Impact de l'anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins. Exemple de la Manche-mer du nord. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Hors-série 8). doi:10.4000/vertigo.10129
- American Coatings Association. (2018, 17 juillet). California DPR Copper-based Antifouling Coating Restrictions in Effect. *American Coatings Association*. Repéré à <https://www.paint.org/dpr-copper/>
- Andreae, H. (2014, 14 novembre). Anti-fouling your boat: Everything you need to know. *Motor Boat & Yachting*. Repéré à <https://www.mby.com/gear/anti-fouling-boat-tips-advice-43285>
- Antidote. (s.d.). Définition de biofilm.
- Archana, S., Sundaramoorthy, B., Neethiselvan, N. et Jeyashakila, R. (2017). Effects of Nano-coating on biofilm forming bacteria on different boat building materials using 16sr DNA. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. Repéré à <http://www.fisheriesjournal.com/archives/2017/vol5issue4/PartD/5-4-13-506.pdf>
- Armateurs de France. (2017). Le contrôle des navires par l'Etat du port. Repéré à [http://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/fiche\\_controle\\_navire\\_etat\\_du\\_port\\_adf\\_2017.pdf](http://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/fiche_controle_navire_etat_du_port_adf_2017.pdf)
- Australian Government. (2015). Anti-fouling and In-water Cleaning Guidelines, 35.
- Beckers, D. (2010). *Boat fouling organisms*. Repéré à [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boat\\_fouling\\_organisms\\_\(4875278100\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boat_fouling_organisms_(4875278100).jpg)
- Bighiu, M. A. (2017). *Use and environmental impact of antifouling paints in the Baltic Sea* (Stockholm University). Repéré à <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1073109&dswid=4434>
- Bouvier-Auclair, R. (2018, 24 janvier). ALENA : les coulisses du sixième cycle de renégociation à Montréal. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1080029/alena-organisation-renegociation-sixieme-cycle-montreal-negociateurs>
- Bressy, C. et Noblet Lejars, M. (2014). Marine Fouling : An Overview. *Journal of Ocean Technology*, 9, 19-28.
- Brignon, J. M. (2005). *TRIBUTYLETAIN* (n° 1-mai 05). Repéré à <https://substances.ineris.fr/fr/substance/cas/688-73-3/3>
- British Columbia Ministry of Energy and Mines. (2003, décembre). Sonar versus Seismic: What are the Differences? Repéré à [https://www.cagc.ca/resources/marine\\_seismic/seismic\\_vs\\_sonar.pdf](https://www.cagc.ca/resources/marine_seismic/seismic_vs_sonar.pdf)
- California Biodiversity Council. (2018). California Biodiversity Council. Repéré à <http://biodiversity.ca.gov/>
- Candries, M., Anderson, C. D. et Atlar, M. (2001, avril). Foul Release Systems and Drag: Observations on How the Coatings Work. Repéré à [https://www.paintsquare.com/library/articles/Foul\\_Release\\_Systems\\_and\\_Drag\\_Observations\\_on\\_How\\_the\\_Coatings\\_Work.pdf](https://www.paintsquare.com/library/articles/Foul_Release_Systems_and_Drag_Observations_on_How_the_Coatings_Work.pdf)
- Cantin, G. (2014, novembre). Réduction encourageante des risques de collisions avec les baleines. *Pêches et Océans Canada - Région du Québec*, 17(5). Repéré à <http://www.qc.dfo-mpo.gc.ca/infoceans/201410/article7-fra.html>
- Cathelco Limited. (2018). How does an ICCP system work? *Cathelco*. Repéré à <http://www.cathelco.com/iccp->

overview/how-does-an-iccp-system-work/

Centre Saint-Laurent. (2000). *Présence de la moule zébrée dans le Saint-Laurent: à suivre*. Montréal : Centre Saint-Laurent.

Charnock, J. (1801). *History of Marine Architecture*. Repéré à [https://books.google.ca/books/about/History\\_of\\_Marine\\_Architecture.html?id=Gt1L2y0VCgMC&redir\\_esc=y](https://books.google.ca/books/about/History_of_Marine_Architecture.html?id=Gt1L2y0VCgMC&redir_esc=y)

CIRS. (2013, juin). Korea REACH - The Act on the Registration and Evaluation of Chemicals | CIRS. Repéré à [http://www.cirs-](http://www.cirs-reach.com/KoreaTCCA/Korea_REACH_The_Act_on_the_Registration_and_Evaluation_of_Chemicals.html)

[reach.com/KoreaTCCA/Korea\\_REACH\\_The\\_Act\\_on\\_the\\_Registration\\_and\\_Evaluation\\_of\\_Chemicals.html](http://www.cirs-reach.com/KoreaTCCA/Korea_REACH_The_Act_on_the_Registration_and_Evaluation_of_Chemicals.html)

CNRTL. (s.d.). FRAGILE : Définition de FRAGILE. Repéré à <http://www.cnrtl.fr/definition/fragile>

Compere, C. (1999). Biofilms en milieu marin. *Techniques Sciences Méthodes*, (11), 48-54.

Constitution Canadienne. (s.d.). Lois codifiées Règlements codifiés. Repéré à [https://laws-](https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/Const/page-4.html#h-17)

[lois.justice.gc.ca/fra/Const/page-4.html#h-17](https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/Const/page-4.html#h-17)  
Côté, I. M., Dodson, J. J., Fleming, I. A., Hutchings, J. A., Jennings, S., Mantua, N., ... VanderZwaag, D. L. (2012). *Le maintien de la biodiversité marine au Canada : relever les défis posés par les changements climatiques, les pêches et l'aquaculture*. La Société Royale du Canada. Les Académies des Arts, des lettres et des sciences du Canada. Repéré à [http://www.quebec-](http://www.quebec-ocean.ulaval.ca/pdf_xls_files/Documentation_SRC%20fev_2012_Rapport_en_bref_maintien_biodiversite_marine.pdf)

[ocean.ulaval.ca/pdf\\_xls\\_files/Documentation\\_SRC%20fev\\_2012\\_Rapport\\_en\\_bref\\_maintien\\_biodiversite\\_marine.p](http://www.quebec-ocean.ulaval.ca/pdf_xls_files/Documentation_SRC%20fev_2012_Rapport_en_bref_maintien_biodiversite_marine.pdf)  
[df](http://www.quebec-ocean.ulaval.ca/pdf_xls_files/Documentation_SRC%20fev_2012_Rapport_en_bref_maintien_biodiversite_marine.pdf)  
Culver, H. B. et Grant, G. (1928). *The Book of Old Ships*. Repéré à [https://books.google.ca/books?id=6JffAAAAMAAJ&dq=CuLVER%2C%20The%20Book%20of%20Old%20Ships.%20%201928.&hl=fr&source=gbp\\_book\\_other\\_versions](https://books.google.ca/books?id=6JffAAAAMAAJ&dq=CuLVER%2C%20The%20Book%20of%20Old%20Ships.%20%201928.&hl=fr&source=gbp_book_other_versions)

Dafforn, K. A., Lewis, J. A. et Johnston, E. L. (2011). Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 62(3), 453-465. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.01.012

Deblois, M. (2018, 20 décembre). Entrevue avec Michel Deblois dans le cadre de l'essai.

Department of Pesticide Regulation. (2017). LIST OF COPPER-BASED ANTIFOULANT PAINTS, 10.

Department of Pesticide Regulation. (2018). *FINAL DECISION CONCERNING REEVALUATION OF COPPER BASED ANTIFOULING PAINT PESTICIDES* (n° California Notice 2018-03) (p. 3). Repéré à <https://www.cdpr.ca.gov/docs/registration/canot/2018/ca2018-03.pdf>

Dimitrova, D. N. (2010). *Seafarers' Rights in the Globalized Maritime Industry*. AUSTIN : Wolters Kluwer, Law & Business. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=Jzmw8IWV-74C&pg=PA142&lpg=PA142&dq=ICS%26ISF,+2009&source=bl&ots=qmtkEHhZqg&sig=TjX6imRrELp298X7WovM-JoO2R8&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwicznard59PdAhUshOAKHdI6B3EQ6AEwAHoECAEAQAQ#v=onepage&q=ICS%26ISF%2C%202009&f=false>

Ebdon, L., Pitts, L., Cornelis, R., Crews, H., Donard, O. F. X. et Quevauviller, P. (2007). *Trace Element Speciation for Environment, Food and Health*. Royal Society of Chemistry.

ECHA. (sda). Comprendre le règlement sur les produits biocides - ECHA. Repéré à <https://echa.europa.eu/fr/regulations/biocidal-products-regulation/understanding-bpr>

ECHA. (sdb). Prochaines échéances - ECHA. Repéré à <https://echa.europa.eu/fr/regulations/biocidal-products-regulation/upcoming-deadlines>

Ejhed, H., Cousins, A. P., Karlsson, M., Köhler, S. J., Huser, B. et Westerberg, I. (2011). *Feasibility study of net load of metals* (n° SMED Rapport Nr 50 2011). På uppdrag av Naturvårdsverket. Repéré à [http://www.smed.se/wp-](http://www.smed.se/wp-content/uploads/2011/08/SMED_Rapport_2011_50.pdf)

[content/uploads/2011/08/SMED\\_Rapport\\_2011\\_50.pdf](http://www.smed.se/wp-content/uploads/2011/08/SMED_Rapport_2011_50.pdf)  
Environnement Canada. (2012, 26 juin). Environnement et Changement climatique Canada - Programme de partenariat sur les espèces exotiques envahissantes : Rapport 2005–2010. Repéré à <http://ec.gc.ca/nature/default.asp?lang=Fr&n=B008265C-1>

Environnement Canada et Santé Canada. (2010, 7 juin). Persistence, bioaccumulation and inherent toxicity. *aem*. datasets. Repéré à [https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-](https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/substances-list/persistence-bioaccumulation-inherent-toxicity.html)

[protection-act-registry/substances-list/persistence-bioaccumulation-inherent-toxicity.html](https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/canadian-environmental-protection-act-registry/substances-list/persistence-bioaccumulation-inherent-toxicity.html)  
European Commission. (2003, 25 juillet). European Commission - PRESS RELEASES - Press release - ERIKA I maritime safety legislation enters into force: Commission takes action against 10 Member States. Repéré à

[http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-03-1116\\_en.htm?locale=en](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-03-1116_en.htm?locale=en)

EXTOXNET. (1996, juin). EXTOXNET PIP - TRIBUTYLTIN (TBT). Repéré à <http://extoxnet.orst.edu/pips/tributyl.htm>

Floch, H., Deschiens, R. et Lecorroller, Y. (1964). ON THE ELECTIVE MOLLUSCICIDAL ACTION OF CUPROUS OXIDE, METALLIC COPPER. *Bulletin de la Société de pathologie exotique et de ses*, 57, 124-138.

FRANCIS, P. (s.d.). *CATHODIC PROTECTION*. Repéré à [http://www.npl.co.uk/upload/pdf/cathodic\\_protection\\_in\\_practise.pdf](http://www.npl.co.uk/upload/pdf/cathodic_protection_in_practise.pdf)

Futura Sciences. (s.d.). Amphipathique. *Futura*. Repéré à <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-amphipathique-11505/>

Gagné, G. (2018, 12 janvier). Retour à la vitesse normale de circulation des navires dans le golfe du Saint-Laurent. *Le Soleil*. Repéré à <https://www.lesoleil.com/actualite/en-region/retour-a-la-vitesse-normale-de-circulation-des-navires-dans-le-golfe-du-saint-laurent-d0a7ad0e7688f1b2dec6535a224ad07e>

Gazette du Canada. (2006, 4 mars). publication du samedi 4 mars 2006. Repéré à <http://publications.gc.ca/gazette/archives/p1/2006/2006-03-04/pdf/g1-14009.pdf>

Georgia Strait Alliance. (2008). *Alternative Fouling Control Systems (Environmental options for bottom painting)*. Repéré à [https://georgiastrait.org/wp-content/uploads/2015/03/Final\\_Summary\\_Alternatives\\_to\\_biocidal1.pdf](https://georgiastrait.org/wp-content/uploads/2015/03/Final_Summary_Alternatives_to_biocidal1.pdf)

Grand View Research. (2016a, février). Antifouling Coating Market Size | Industry Report, 2022. Repéré à <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/antifouling-coating-market>

Grand View Research. (2016b, avril). Antifouling coating market size to grow at a CAGR of 5.0% from 2015 to 2022. Repéré à <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-antifouling-coating-market>

Great Barrier Reef Marine Park Authority. (s.d.). Boating and yachting. Repéré à <http://www.gbrmpa.gov.au/access-and-use/responsible-reef-practices/boating-and-yachting>

Greenslade, B. (2015, 9 octobre). Zebra mussels cost Canadians billions each year; cost to Manitobans still unknown | Globalnews.ca. Repéré à <https://globalnews.ca/news/2269026/zebra-mussels-cost-canadians-billions-each-year-cost-to-manitobans-still-unknown/>

Hack, H. P., Miller, B. E. et Davis, D. A. (1974). *Impressed-Current Cathodic Protection for Surface-Effect Ships* (n° Report 4200) (p. 46). Repéré à <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/921556.pdf>

HOYT GORMAN, D. (2014, 27 novembre). Low-emission anti-fouling research shows progress - SuperyachtNews. *Superyacht News*. Repéré à <http://www.superyachtnews.com/business/low-emission-anti-fouling-research-shows-good-progress>

IMO. (2002). *Anti-fouling systems*. International Maritime Organization. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Anti-foulingSystems/Documents/FOULING2003.pdf>

IMO. (2009). *Second IMO GHG Study 2009*. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>

IMO. (2011a). *IMO and the environment*. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Documents/IMO%20and%20the%20Environment%202011.pdf>

IMO. (2011b). Plan stratégique de l'Organisation. Repéré à <http://www.imo.org/fr/About/strategy/pages/default.aspx>

IMO. (2015). *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014* (p. 295). Repéré à [https://gmh.imo.org/wp-content/uploads/2017/05/GHG3-Executive-Summary-and-Report\\_web.pdf](https://gmh.imo.org/wp-content/uploads/2017/05/GHG3-Executive-Summary-and-Report_web.pdf)

IMO. (2018a). Convention internationale sur le contrôle des systèmes antisalissure nuisibles sur les navires. Repéré à [http://www.imo.org/fr/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-\(AFS\).aspx](http://www.imo.org/fr/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-on-the-Control-of-Harmful-Anti-fouling-Systems-on-Ships-(AFS).aspx)

IMO. (2018b). Conventions. Repéré à <http://www.imo.org/fr/About/Conventions/Pages/Home.aspx>

IMO. (2018c). Member States. Repéré à <http://www.imo.org/en/About/Membership/Pages/MemberStates.aspx>

IMO. (s.d.). Greenhouse Gas Study 2009. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Greenhouse-Gas-Study-2009.aspx>

International Paint LLC. (s.d.). intersleek-900-info-booklet-usa-eng.pdf. Repéré à <http://www.yachtpaint.com/LiteratureCentre/intersleek-900-info-booklet-usa-eng.pdf>

Jelmert, A. et Van Leeuwen, H. (2000). Harming local species or preventing the transfer of exotics? Possible negative and positive effects of using zinc anodes for corrosion protection of ballast water tanks. *Water Research*, 34(6), 1937-1940. doi:10.1016/S0043-1354(99)00416-9. Repéré à [https://www.researchgate.net/publication/229339217\\_Harming\\_local\\_species\\_or\\_preventing\\_the\\_transfer\\_of\\_exotics\\_Possible\\_negative\\_and\\_positive\\_effects\\_of\\_using\\_zinc\\_anodes\\_for\\_corrosion\\_protection\\_of\\_ballast\\_water\\_tanks](https://www.researchgate.net/publication/229339217_Harming_local_species_or_preventing_the_transfer_of_exotics_Possible_negative_and_positive_effects_of_using_zinc_anodes_for_corrosion_protection_of_ballast_water_tanks)

Josselin, M.-L. (2017, 24 septembre). Le passage du Nord-Ouest, source d'inquiétudes. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1057390/passage-nord-ouest-nunavut-arctique-nord-c3-canada-maritime-polaire-glace>

Kaupp, R. (2018, 23 octobre). Cathodic protection. Dans *Wikipedia*. Repéré à [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cathodic\\_protection&oldid=865409604](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cathodic_protection&oldid=865409604)

Kavin, K. (2018, 24 janvier). This Antifouling Coating Creates a 'Liquid Surface'. *Soundings Online*. Repéré à <https://www.soundingsonline.com/boat-shop/this-antifouling-coating-creates-a-liquid-surface>

Khanna, A. S. (2008). Nanotechnology in High Performance Paint Coatings. 2008, 21(2). Repéré à <http://www.ajesjournal.com/PDFs/08-2/2.%20Nanotechnology-A%20boon.pdf>

La Presse Canadienne. (2011, 5 janvier). Le port de Montréal n'a pas encore retrouvé son trafic d'avant la crise. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/economie/314088/le-port-de-montreal-n-a-pas-encore-retrouve-son-traffic-d-avant-la-crise>

La Presse Canadienne. (2018, 3 janvier). Année record pour le trafic de marchandises au port de Montréal en 2017. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1076084/trafic-marchandises-record-port-montreal-2017>

Larousse. (2018a). Définitions : biocide - Dictionnaire de français Larousse. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biocide/9394>

Larousse. (2018b). Définitions : poix - Dictionnaire de français Larousse. Repéré à <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/poix/62101>

Le Pensec, L. et Pinon, H. (2007). *Analyse Stratégique : Age & Durée de vie des navires*. Repéré à <http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0059/Temis-0059645/16826.pdf>

Lee, M., Gregorich, L. J., Kavanagh, M., Hovorka, M. et Canadian Wildlife Service. (2003). *Les espèces exotiques envahissantes au Canada*. Ottawa : Service canadien de la faune. Repéré à <http://www.hww.ca/fr/enjeux-et-themes/les-especes-exotiques.html>

l'Encyclopédie Canadienne. (2015, 4 mars). Passage du Nord-Ouest | l'Encyclopédie Canadienne. Repéré à <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/passage-du-nord-ouest>

Lindholdt, A., Dam-Johansen, K. et Kiil, S. (2015). Effects of biofouling development on drag forces of hull coatings for ocean-going ships: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*. Repéré à <https://nouveau.eureka.cc/Link/unisher1/news·20150501·GJABY·444308938>

Marine Nano Shop. (2017, 1 mai). Ceramic Marine Nano Coatings | Naples Florida. *Marine Nano Shop*. Repéré à <https://www.marinenanoshop.com/blog/2017/5/1/ceramic-marine-nano-coatings-naples-florida>

Markets and Markets. (2016, juin). Antifouling Paints & Coatings Market worth 9.22 Billion USD by 2021. Repéré à <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/antifouling-paint-coating.asp>

MATERIALS PERFORMANCE. (2015, 31 juillet). Advanced Fluoropolymer Fouling-Release Coating. *MATERIALS PERFORMANCE*. Repéré à <http://www.materialsperformance.com/articles/coating-linings/2015/08/advanced-fluoropolymer-fouling-release-coating>

Mattila, M., Carpen, L., Hakkarainen, T. et Salkinoja-Salonen, M. S. (1997). Biofilm development during ennoblement of stainless steel in Baltic Sea water: A microscopic study. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 40(1), 1-10. doi:10.1016/S0964-8305(97)00003-6

MDELCC. (2018). Fleuve Saint-Laurent. Repéré à <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/eau/flrivlac/fleuve.htm>

Merinov. (s.d.). *Mission, mandat, clientèle*. Repéré à <https://www.merinov.ca/fr/organisation/mission-mandat-clientele>

Mochida, K., Ito, K., Harino, H., Kakuno, A. et Fujii, K. (2006). ACUTE TOXICITY OF PYRITHIONE ANTIFOULING BIOCIDES AND JOINT TOXICITY WITH COPPER TO RED SEA BREAM (PAGRUS MAJOR) AND TOY SHRIMP (HEPTACARPUS FUTILIROSTRIS). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25(11), 3058. doi:10.1897/05-688R.1

- Munson, B. R., Young, D. F. et Okiishi, T. H. (2006). *Fundamentals of fluid mechanics* (5th ed). Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons.
- National Physical Laboratory. (2000). *Bimetallic Corrosion*. Repéré à [http://www.npl.co.uk/upload/pdf/bimetallic\\_20071105114556.pdf](http://www.npl.co.uk/upload/pdf/bimetallic_20071105114556.pdf)
- Nilsson, J. et Gipperth, L. (2015). *Antifouling for leisure boats in the Baltic Sea* (p. 33). National Study - Sweden. Repéré à [https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/54367/1/gupea\\_2077\\_54367\\_1.pdf](https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/54367/1/gupea_2077_54367_1.pdf)
- Office québécois de la langue française. (2016). antisalissure. Repéré à [http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=8360101](http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8360101)
- Office québécois de la langue française. (s.d.). ductile. Repéré à [http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id\\_Fiche=17568624](http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17568624)
- Oldani, V., del Negro, R., Bianchi, C. L., Suriano, R., Turri, S., Pirola, C. et Sacchi, B. (2015). Surface properties and anti-fouling assessment of coatings obtained from perfluoropolyethers and ceramic oxides nanopowders deposited on stainless steel. *Journal of Fluorine Chemistry*, 180, 7-14. doi:10.1016/j.jfluchem.2015.08.019
- Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X. et Rutherford, D. (2017). *Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015* (p. 38). Repéré à [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015\\_ICCT-Report\\_17102017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf)
- Overton, M. (2018, 30 avril). Washington State Halts Its Ban on Antifouling Copper Paints. *Marina Dock Age*. Repéré à <https://www.marinadockage.com/washington-state-halts-ban-antifouling-copper-paints/>
- Patry, M., Bassett, C. et Leclercq, B. (2005). THE STATE OF CONSERVATION OF WORLD HERITAGE FORESTS, 14.
- Pêches et Océans Canada. (2004, septembre). Plan d'action canadien de lutte contre les espèces aquatiques envahissantes. Repéré à <http://www.dfo-mpo.gc.ca/species-especes/publications/ais-eae/plan/index-fra.html>
- Pêches et Océans Canada. (2012). *Rapport du Canada sur l'état des océans 2012* (n° Fs23-578/2012E-PDF). Repéré à <http://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/346702.pdf>
- Pianoforte, K. (2015, août). The Marine Coatings Market. *Coatings World*. Repéré à [https://www.coatingsworld.com/issues/2015-08-01/view\\_features/the-marine-coatings-market-147537/](https://www.coatingsworld.com/issues/2015-08-01/view_features/the-marine-coatings-market-147537/)
- Port de Montréal. (2018). STATISTIQUES - Port de Montréal. Repéré à <https://www.port-montreal.com/PMStats/html/frontend/statistics.jsp?lang=fr&context=business>
- Research and Markets. (2018, juin). Global Marine Coatings (Anti-Corrosion & Antifouling) Market 2018-2022 - Increasing Demand From the Oil & Gas Industry. Repéré à <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-marine-coatings-anti-corrosion--antifouling-market-2018-2022---increasing-demand-from-the-oil--gas-industry-300657501.html>
- Ricardou, F.-X. (2018, 13 juin). Anodes et électrolyse, pour qui, pourquoi ? *Bateaux.com*. Repéré à <https://www.bateaux.com/article/20533/Les-anodes-pour-qui-pourquoi>
- Schultz, M. P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 23(5), 331-341. doi:10.1080/08927010701461974
- Selim, M. S., Shenashen, M. A., El-Safty, S. A., Higazy, S. A., Selim, M. M., Isago, H. et Elmarakbi, A. (2017). Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings. *Progress in Materials Science*, 87, 1-32. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.02.001
- Service d'informations et de relations publiques des armées Marine. (2013, 20 mars). Le cycle de vie d'un navire. Repéré à <https://www.defense.gouv.fr/marine/magazine/le-cycle-de-vie-d-un-navire/le-cycle-de-vie-d-un-navire>
- Statistique Canada. (2018, février). Manutention du fret maritime - 48832 - Performance financière - Statistiques relatives à l'industrie canadienne - Innovation, Sciences et Développement économique Canada. Repéré à [http://www.opic.ic.gc.ca/app/scr/app/cis/performance/48832;jsessionid=0001eQvE\\_BFkvdEcXVaFHWsz5uB:-O32C1K?wbdisable=true&=undefined&lang=fr](http://www.opic.ic.gc.ca/app/scr/app/cis/performance/48832;jsessionid=0001eQvE_BFkvdEcXVaFHWsz5uB:-O32C1K?wbdisable=true&=undefined&lang=fr)
- Toupoint, N. (2018, 17 décembre). Entrevue avec Nicolas Toupoint dans le cadre de l'essai.
- Toupoint, N., Nadeau, M. et Chevarie, P. (2017). *Lutte antisalissure : Développement de techniques non-biocides pour la mariculture* (n° RAPPORT PROJET NO 17-12) (p. 31). MERINOV.
- Transport Canada. (2018a, 20 avril). Lignes Directrices Concernant l'Exploitation des Navires à Passagers Dans l'Arctique Canadien - TP 13670. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/securitemaritime/lignes-directrices-concernant-exploitation-navires-passagers-arctique-canadien-tp13670f.html>

Transport Canada. (2018b, 15 mai). Évaluation des impacts environnementaux et sociaux et des avantages du transport maritime à courte distance au Canada. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/acf-acfs-evaluation-des-impacts-et-des-avantages-2600.htm>

Transport Canada. (s.d.). Alien\_Species\_Table.pdf. Repéré à [http://www.icaais.org/pdf/Alien\\_Species\\_Table.pdf](http://www.icaais.org/pdf/Alien_Species_Table.pdf)

Transports Canada. (2010a, 7 janvier). Le programme canadien d'eau de ballast : Introductions par les navires - Protection de l'environnement - Sécurité maritime - Transport maritime - Transports Canada. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/securitemaritime/epe-environnement-ballast-introductions-2194.htm#01b>

Transports Canada. (2010b, 7 janvier). Navigation dans l'Arctique - Design, équipement, et sécurité nautique - Sécurité maritime - Transport maritime - Transports Canada. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/securitemaritime/desn-arctique-menu-303.htm>

Truite Illimité Canada. (2016, 29 novembre). Stop the Spread-Zebra Mussel. *Trout Unlimited Canada*. Repéré à <https://tucanada.org/stop-spread-zebra-mussel/>

U. S. Census Bureau. (2018, mai). American FactFinder - Results - population. Repéré à <https://factfinder.census.gov/faces/tableservices/jsf/pages/productview.xhtml?src=bkmk>

UNCTADstat. (2017, 27 octobre). UNCTADstat - Affichage de tableau - Trafic maritime mondial par groupe de marchandises et par groupes d'économies, annuel, 1970-2016. Repéré à <http://unctadstat.unctad.org/wds/TableViewer/tableView.aspx>

UNESCO. (s.d.-a). La Convention du patrimoine mondial. *UNESCO Centre du patrimoine mondial*. Repéré à <https://whc.unesco.org/fr/convention/>

UNESCO. (s.d.-b). La Grande Barrière. *UNESCO Centre du patrimoine mondial*. Repéré à <https://whc.unesco.org/fr/list/154/>

United Nations Conference on Trade and Development. (2017). *Review of maritime transport 2017*. Repéré à [https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017\\_en.pdf](https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf)

Vigarié, A. (1983). Les tendances d'évolution des transports maritimes (1955-1985). *Annales de géographie*, 92(509), 53-72. doi:10.3406/geo.1983.20168

Voulvoulis, N., Scrimshaw, M. D. et Lester, J. N. (1999). Alternative antifouling biocides. *Applied Organometallic Chemistry*, 13(3), 135-143. doi:10.1002/(SICI)1099-0739(199903)13:3<135::AID-AOC831>3.0.CO;2-G

Wezenbeek, O. (s.d.). Blog Post - Best fouling control coatings technology - Marine - AkzoNobel. Repéré à <https://www.international-marine.com/blog/best-fouling-control-coatings-technology>

WHOI. (1952). *Marine Fouling and Its Prevention*. United States Naval Institute. Repéré à <http://www.vliz.be/imisdocs/publications/224762.pdf>

Wikipedia. (s.d.). Fichier:Passenger ship Zaandam in drydock.jpg — Wikipédia. Repéré à [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Passenger\\_ship\\_Zaandam\\_in\\_drydock.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Passenger_ship_Zaandam_in_drydock.jpg)